UDŽBENICI SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
MANUALIA UNIVERSITATIS STUDIORUM ZAGRABIENSIS

[redacted]

Dr ing. HRVOJE POŽAR

redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu
redovni član Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti

VISOKONAPONSKA RASKLOPNA POSTROJENJA

TREĆE POPRAVLJENO IZDANJE



TEHNIČKA KNJIGA
ZAGREB

Odobreno rješenjem Komisije za udžbenike i skripta Sveučilišta u Zagrebu broj 08 — 1108/1 — 1973. od 14. lipnja 1973.

Svojoj majci
i majci svoje djece
posvećujem

PREDGOVOR TREĆEM IZDANJU

Potreba za trećim izdanjem ovog udžbenika pokazala je da su ga prihvatili i drugi elektrotehnički fakulteti i elektrotehničke više škole kao svoj udžbenik ili kao dodatnu literaturu, te da je postao jedno od pomagala u praktičnom radu elektrotehničkih inženjera koji se bave projektiranjem i pogonom rasklopnih postrojenja. Radostan sam zbog toga, jer to pokazuje da su moja nastojanja urodila plodom. Udžbenik je, kako je to spomenuto u predgovoru prvom izdanju, namijenjen i studentima elektrotehnike i inženjerima u praksi.

U trećem izdanju provedene su manje izmjene i popravljene pogreške koje su, i pored svih nastojanja, ostale u drugom izdanju. Zahvalan sam doc. dr. ing. Vjekoslavu Filipoviću, doc. ing. Milanu Šodanu i mr. ing. Vladimiru Mikuličiću, koji su ponovno pregledali cijeli tekst i slike i upozorili me na pogreške i nedostatke.

Zagreb, u travnju 1978.

H. Požar

PREDGOVOR DRUGOM IZDANJU

Potreba za drugim izdanjem pojavila se još prije dvije godine, što pokazuje da je knjiga naišla na dobar prijem ne samo kod studenata nego i kod inženjera u praksi. Financijske poteškoće spriječile su ranije objavljivanje drugog izdanja.

Izvršene su korekture opaženih pogrešaka, a neki dijelovi su prerađeni kako bi se dobilo na preglednosti i jasnoći.

Zahvalan sam asistentima dipl. ing. Vjekoslavu Filipoviću, mr. dipl. ing. Nikoli Čupinu i dipl. ing. Vladimiru Mikuličiću na detaljnom pregledu prvog izdanja i upozorenjima na greške i nejasnoće, što je omogućilo potrebne korekture i poboljšanja.

Zagreb, lipnja 1973.

H. Požar

PREDGOVOR PRVOM IZDANJU

Ovaj je udžbenik u prvom redu namijenjen studentima elektrotehnike, a nadam se da će dobro doći i inženjerima u praksi, koji se bave pogonom i projektiranjem rasklopnih postrojenja. U njemu su elementi i izvedbe postrojenja prikazani sa stajališta funkcije i upotrebe, kako bi se primarno shvatilo kako djeluje i zbog čega se odabire aparat, shema ili izvedba određenih karakteristika.

Posebna pažnja posvećena je određivanju struja kratkog spoja (drugo i treće poglavlje), jer one čine osnovu za projektiranje i za kontrolu pogonskih prilika svakog rasklopnog postrojenja. Djelovanje, proračun i kriteriji za izbor glavnih elemenata prikazani su u četvrtom poglavlju. Sheme glavnih strujnih krugova obuhvaćene su u petom, a sheme spoja, djelovanje i upotreba pogonskih mjerenja i zaštitnih uređaja u šestom i sedmom poglavlju. Pomoćnim strujnim krugovima s pomoćnim uređajima u rasklopnim postrojenjima bavi se osmo, dok su u devetom poglavlju prikazane u osnovnim linijama izvedbe postrojenja.

Materija je obrađena šire nego što se obično izlaže u okviru kolegijâ na Elektrotehničkim fakultetima, da bi se s jedne strane omogućilo studentima — koji to za vrijeme studija žele — detaljnije upoznavanje s pojavama, djelovanjem i upotrebom elemenata rasklopnih postrojenja, i da bi s druge strane inženjeri — kad im to bude potrebno u praksi — mogli proširiti znanje stečeno za vrijeme studija.

Ugodna mi je dužnost zahvaliti prof. ing. Antonu Dolencu, koji je pregledao cijeli rukopis, na kritičkim napomenama i korisnim savjetima. Prof. dr ing. Radenko Wolf, prof. dr ing. Vojislav Bego, v. pred. ing. Vladimir Hergešić, v. pred. ing. Boris Belin, pred. ing. Željko Zlatar, asist. ing. Ivo Hrs i asist. ing. Vjekoslav Filipović upozorili su me na manjkavosti i na mogućnosti poboljšanja nakon pregleda pojedinih dijelova rukopisa, na čemu sam posebno zahvalan. Naročitu zahvalnost dugujem v. stručnom suradniku ing. Toussaint-u Levičniku, koji je savjesno izvršio korekture kompliciranog teksta.

Urednik edicije Ivan Uremović, kao i ostali drugovi iz Tehničke knjige pokazali su veliko razumijevanje i susretljivost. Njima kao i osoblju štamparije Vjesnika treba zahvaliti da je knjiga tako lijepo opremljena.

H. Požar

SADRŽAJ

TREĆE POGLAVLJE

ČETVRTO POGLAVLJE

PETO POGLAVLJE

ŠESTO POGLAVLJE

SEDMO POGLAVLJE

OSMO POGLAVLJE

DEVETO POGLAVLJE

OZNAKE UPOTREBLJENE U FORMULAMA

A	površina vodiča
B	magnetska indukcija
C	konstanta brojila
C_{v1}	kapacitet voda po jedinici duljine
E	elektromotorna sila
E	modul elastičnosti (poglavlje 4.1)
$\mathbf{E}_d$	vektor elektromotorne sile direktnog sistema
$\mathbf{E}_i$	vektor elektromotorne sile inverznog sistema
$\mathbf{E}_o$	vektor elektromotorne sile nultog sistema
$\mathbf{E}_R$	vektor elektromotorne sile faze R
$\mathbf{E}_S$	vektor elektromotorne sile faze S
$\mathbf{E}_T$	vektor elektromotorne sile faze T
F	sila na vodič
F	površina pokrivena sastavljenim uzemljivačem (poglavlje 7.10)
F_p	mjerodavna sila na najviše opterećeni potporni izolator
F_K	faktor naprezanja sklopke
G	masa vodiča
G_u	masa umetaka među sastavljenim sabirnicama
H	magnetsko polje
I	efektivna vrijednost struje
$\mathbf{I}$	vektor struje
I_a	istosmjerna komponenta struje kratkog spoja
I_a	struja izjednačenja paralelno spojenih transformatora (poglavlje 4.5)
$\mathbf{I}_d$	vektor struje direktnog sistema
I_d	trajna struja kratkog spoja (poglavlje 3.6)
I_g	granična efektivna vrijednost struje kroz osigurač
$\mathbf{I}_i$	vektor struje inverznog sistema
I_k	struja kratkog spoja (općenito)
I_k''	efektivna vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja definirane početnom reaktancijom
I_{k1}	struja jednopolnog kratkog spoja
I_{k1}''	efektivna vrijednost izmjenične komponente struje jednopolnog kratkog spoja definirane početnom reaktancijom za slučaj jednopolnog kratkog spoja
I_{k2}	struja dvopolnog kratkog spoja
I_{k2z}	struja dvopolnog kratkog s istodobnim spojem sa zemljom
I_{k3}	struja tropolnog kratkog spoja
I_{k3}''	efektivna vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja definirane početnom reaktancijom za slučaj tropolnog kratkog spoja
I_{kr}	struja kratkog spoja kod koje se postiže maksimalna energija gašenja u osiguraču
I_m	tjemena vrijednost struje
I_m	struja praznog hoda transformatora (poglavlje 2.4)
I_n	nazivna struja
$\mathbf{I}_o$	vektor struje nultog sistema
I_{osn}	osnovna struja za preračunavanje na jedinične vrijednosti
$\mathbf{I}_R$	vektor struje u fazi R
$\mathbf{I}_{Rd}$	vektor struje direktnog sistema u fazi R
$\mathbf{I}_{Ri}$	vektor struje inverznog sistema u fazi R
$\mathbf{I}_{Ro}$	vektor struje nultog sistema u fazi R
I_{Ro}	istosmjerna komponenta struje kratkog spoja u fazi R u momentu $t = 0$ (poglavlje 2.3)
I_r	efektivna vrijednost rasklopne struje
I_{rk1}	rasklopna struja za slučaj jednopolnog kratkog spoja
I_{rk3}	rasklopna struja za slučaj tropolnog kratkog spoja
I_{rmax}	maksimalna rasklopna struja
$\mathbf{I}_S$	vektor struje u fazi S
$\mathbf{I}_{Sd}$	vektor struje direktnog sistema u fazi S
$\mathbf{I}_{Si}$	vektor struje inverznog sistema u fazi S
$\mathbf{I}_{So}$	vektor struje nultog sistema u fazi S
I_{So}	istosmjerna komponenta struje kratkog spoja u fazi S u momentu $t = 0$ (poglavlje 2.3e)
$\mathbf{I}_T$	vektor struje u fazi T
$\mathbf{I}_{Td}$	vektor struje direktnog sistema u fazi T

$\mathbf{I}_{Ti}$ vektor struje inverznog sistema u fazi T

$\mathbf{I}_{T0}$ vektor struje nultog sistema u fazi T

I_t struja mjerodavna za ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkog spoja (efektivna vrijednost struje kratkog spoja za vrijeme njegovog trajanja)

I_{ter} termična granična struja strujnog transformatora

I_u udarna struja kratkog spoja

I_{uef} efektivna vrijednost udarne struje kratkog spoja

I_Z struja uzemljenja (poglavlje 7.10)

J momenat tromosti

K prijenosni omjer strujnog transformatora

K kapacitet akumulatorske baterije (poglavlje 8.6)

L induktivitet

L_d uzdužni sinhroni induktivitet sinhronog generatora

L_d' prelazni uzdužni induktivitet sinhronog generatora

L_d'' početni uzdužni induktivitet sinhronog generatora

L_i inverzni induktivitet sinhronog generatora

L_m induktivitet uzbudnog namota

L_0 nulti induktivitet sinhronog generatora

L_{pd} induktivitet uzdužnog prigušnog namota

L_{pq} induktivitet poprečnog prigušnog namota

L_q poprečni sinhroni induktivitet sinhronog generatora

L_q' prelazni poprečni induktivitet sinhronog generatora

L_q'' početni poprečni induktivitet sinhronog generatora

L_R induktivitet namota faze R statora

L_{Rd} uzdužni induktivitet namota faze R statora

L_{Rq} poprečni induktivitet namota faze R statora

L_{1R} induktivitet namota faze R koji odgovara toku φ_{1R}

L_S induktivitet namota faze S statora

L_T induktivitet namota faze T statora

L_{r1} induktivitet voda po jedinici duljine

M momenat savijanja

M masa vodiča (poglavlje 4.3)

M zakretni momenat (poglavlje 6)

M_{mpd} međuinduktivitet uzbudnog namota i poprečnog prigušnog namota

M_{Rm} međuinduktivitet namota faze R statora i uzbudnog namota

M_{Rpd} međuinduktivitet namota faze R statora i uzdužnog prigušnog namota

M_{Rpq} međuinduktivitet namota faze R statora i poprečnog prigušnog namota

M_{RS} međuinduktivitet namotâ faza R i S statora

M_{RT} međuinduktivitet namotâ faza R i T statora

M_{Sm} međuinduktivitet namota faze S statora i uzbudnog namota

M_{Spd} međuinduktivitet namota faze S statora i uzdužnog prigušnog namota

M_{Spq} međuinduktivitet namota faze S statora i poprečnog prigušnog namota

M_{ST} međuinduktivitet namotâ faza S i T statora

M_{Tm} međuinduktivitet namota faze T statora i uzbudnog namota

M_{Tpd} međuinduktivitet namota faze T statora i uzdužnog prigušnog namota

M_{Tpq} međuinduktivitet namota faze T statora i poprečnog prigušnog namota

M_{1SR} međuinduktivitet koji odgovara toku φ_{1SR}

N broj aparata ili kilometara vodova (poglavlje 5.2)

P djelatna snaga

P učin kompresora (poglavlje 8.7)

P_l snaga luka (poglavlje 9)

Q jalova snaga

Q toplina akumulirana u luku (poglavlje 4.3)

Q_r potrebna količina zraka za jedno uklapanje i jedno isklapanje rastavljača (poglavlje 8.7)

Q_s potrebna količina zraka za jedno uklapanje i jedno isklapanje sklopke (poglavlje 8.7)

R djelatni otpor

R_m djelatni otpor mreže od priključnica generatora do mjesta kratkog spoja

R_u unutarnji otpor članka akumulatorske baterije (poglavlje 8.6)

S prividna snaga (općenito)

S rasklopna snaga sklopke

S_{k1} rasklopna snaga za slučaj jednopolnog kratkog spoja

S_{k3} rasklopna snaga za slučaj tropolnog kratkog spoja

S_n nazivna prividna snaga

S_{osn} osnovna snaga za preračunavanje na jedinične vrijednosti

S_1 rasklopna snaga jednog pola sklopke

T vremenska konstanta

T trajanje prekida zbog kvarova na jednom aparatu (poglavlje 5.2)

T apsolutna temperatura (poglavlje 8.7)

T_a vremenska komponenta istosmjerne komponente struje kratkog spoja

T_{am} vremenska konstanta istosmjerne komponente struje kratkog spoja uzevši u obzir i utjecaj mreže

T_d' vremenska konstanta prelazne izmjenične struje kratkog spoja

T_d'' vremenska konstanta početne izmjenične struje kratkog spoja

T_{dm}' vremenska konstanta prelazne izmjenične struje kratkog spoja uzevši u obzir i utjecaj mreže

T_{dm}'' vremenska konstanta početne izmjenične struje kratkog spoja uzevši u obzir i utjecaj mreže

T_{0d}' vremenska konstanta generatora u praznom hodu (za generator bez prigušnog namota)

T_{0d}'' vremenska konstanta generatora u praznom hodu (za generator s prigušnim namotom)

T_{0q}'' vremenska konstanta poprečnog prigušnog namota

T_q'' vremenska konstanta poprečne komponente početne struje kratkog spoja

U_i donji izolacioni nivo (poglavlje 4.8)

U_m maksimalni dopustivi napon, kojeg može izdržati oprema (poglavlje 4.8)

U_n nazivni napon (linijski)

U_0 visina napona na odvodniku

U_{osn} osnovni napon za preračunavanje na jedinične vrijednosti

U_p preostali napon (poglavlje 4.8)

V efektivna vrijednost faznog napona

V volumen zraka (poglavlje 8.7)

$\mathbf{V}_d$ vektor faznog napona direktnog sistema

V_d potrebna količina zraka kroz 24 sata (poglavlje 8.7)

$\mathbf{V}_i$ vektor faznog napona inverznog sistema

V_k fazni napon kratkog spoja transformatora

V_m tjemena vrijednost faznog napona

V_n nazivni napon (fazni)

$\mathbf{V}_0$ vektor faznog napona nultog sistema

V_p maksimalna vrijednost prekidnog napona

$\mathbf{V}_R$ vektor napona faze R

V_R volumen rezervoara zraka (poglavlje 8.7)

V_{Rs} volumen rezervoara zraka sklopke (poglavlje 8.7)

$\mathbf{V}_S$ vektor napona faze S

$\mathbf{V}_T$ vektor napona faze T

$V_{\check{z}}$ specifični gubici u željezu

W momenat otpora (poglavlje 4.1)

W_l energija luka

X reaktancija

X_d direktna reaktancija (općenito)

X_d uzdužna sinhrona reaktancija sinhronog generatora

X_d' prelazna (tranzientna) uzdužna reaktancija sinhronog generatora

X_d'' početna (subtranzientna) uzdužna reaktancija sinhronog generatora

X_{dg} sinhrona reaktancija generatora

X_{dg}' prelazna reaktancija sinhronog generatora

X_{dg}'' početna reaktancija sinhronog generatora

X_i inverzna reaktancija (općenito)

X_i inverzna reaktancija sinhronog generatora

X_{ig} inverzna reaktancija generatora

X_{im} inverzna reaktancija mreže od priključnica generatora do mjesta kratkog spoja

X_k reaktancija kratkog spoja prigušnice

X_m reaktancija definirana međuinduktivitetom statora i rotora

X_m reaktancija mreže (poglavlje 4.3)

X_{mr} reaktancija rasipanja uzbudnog namota

X_0 nulta reaktancija (općenito)

X_0 nulta reaktancija sinhronog generatora

X_{0g} nulta reaktancija generatora

X_{0m} nulta reaktancija mreže od priključnica generatora do mjesta kratkog spoja

X_{pdr} reaktancija rasipanja uzdužnog prigušnog namota

X_{pqr} reaktancija rasipanja poprečnog prigušnog namota

X_q poprečna sinhrona reaktancija sinhronog generatora

X_q' prelazna (tranzientna) poprečna reaktancija sinhronog generatora

X_q'' početna (subtranzientna) poprečna reaktancija sinhronog generatora

X_{sqr} reaktancija rasipanja statorskog namota u poprečnoj osi

X_{sr} reaktancija statorskog namota

Z valni otpor voda

$\mathbf{Z}_d$ direktna impedancija

Z_d direktna impedancija nadoknadne sheme mreže, ako se za generator postavi sinhrona reaktancija

Z_d' direktna impedancija nadoknadne mreže, ako se za generator postavi prelazna reaktancija

Z_d'' direktna impedancija nadoknadne mreže, ako se za generator postavi početna reaktancija

Z_{dm} direktna impedancija mreže od priključnica generatora do mjesta kratkog spoja

$\mathbf{Z}_i$ inverzna impedancija
$\mathbf{Z}_K$ impedancija preko koje se zatvara struja kratkog spoja
Z_n impedancija između nul-tačke transformatora i zemlje
Z_n nazivna impedancija strujnog transformatora (poglavlje 4)
$\mathbf{Z}_o$ nulta impedancija
Z_{osn} osnovna impedancija za preračunavanje na jedinične vrijednosti
Z_p rezultantna impedancija paralelno spojenih dijelova mreže
a operator
a veličina ovisna o materijalu i dopuštenom povišenju temperature za određivanje potrebnog presjeka kabela (poglavlje 4.7)
a razmak među sabirnicama (poglavlje 4.1)
a međusobni razmak uzemljivača (poglavlje 7.10)
a udio rezervoara nižeg tlaka u opskrbi zrakom (poglavlje 8.7)
b širina sabirnice
b broj istovrsnih elemenata spojenih u seriju (poglavlje 5.2)
b udaljenost tačke od ruba uzemljivača (poglavlje 7.10)
c specifična toplina vodiča
c frekvencija mreže (poglavlje 4.1)
c brzina širenja vala u vodu (poglavlje 4.3)
c_1 vlastita frekvencija sabirnica (poglavlje 4.1)
d promjer vodiča
d promjer uzemljivača (poglavlje 7.10)
e momentana vrijednost elektromotorne sile
$\mathbf{e}_d$ vektor elektromotorne sile direktnog sistema u jediničnim vrijednostima
$\mathbf{e}_i$ vektor elektromotorne sile inverznog sistema u jediničnim vrijednostima
$\mathbf{e}_o$ vektor elektromotorne sile nultog sistema u jediničnim vrijednostima
$\mathbf{e}_R$ vektor elektromotorne sile faze R u jediničnim vrijednostima
$\mathbf{e}_S$ vektor elektromotorne sile faze S u jediničnim vrijednostima
$\mathbf{e}_T$ vektor elektromotorne sile faze T u jediničnim vrijednostima
f frekvencija izmjenične struje
f sila na jedinicu duljine vodiča (poglavlje 4.1)
f faktor za određivanje struje taljenja (poglavlje 4.3)
f_p frekvencija prekidnog napona
g faktor istodobnosti isklapanja sklopaka i rastavljača (poglavlje 8.7)

h visina sabirnice (poglavlje 4.1)
h dubina ukopa uzemljivača (poglavlje 7.10)
i momentana vrijednost struje
i struja u jediničnim vrijednostima
i_d momentana vrijednost uzdužne komponente struje statora
$\mathbf{i}_d$ vektor struje direktnog sistema u jediničnim vrijednostima
$\mathbf{i}_i$ vektor struje inverznog sistema u jediničnim vrijednostima
i_l struja luka
i_o momentana vrijednost nulte komponente struje statora
$\mathbf{i}_o$ vektor struje nultog sistema u jediničnim vrijednostima
i_q momentana vrijednost poprečne komponente struje statora
i_R momentana vrijednost struje u fazi R
$\mathbf{i}_R$ vektor struje faze R u jediničnim vrijednostima
i_s konačna vrijednost struje
$\mathbf{i}_S$ vektor struje faze S u jediničnim vrijednostima
i_S momentana vrijednost struje u fazi S
i_T momentana vrijednost struje u fazi T
$\mathbf{i}_T$ vektor struje faze T u jediničnim vrijednostima
i_t struja taljenja osigurača
Δi strujna pogreška strujnog transformatora
$\Delta \mathbf{i}$ struja kroz diferencijalni relej
j imaginarna jedinica
k omjer između udarne i tjemene vrijednosti izmjenične komponente struje kratkog spoja definirane početnom reaktancijom
k korekcioni faktor za određivanje sile među sabirnicama plosnatih profila (poglavlje 4)
k koeficijent za određivanje potencijala uzemljivača (poglavlje 7.10)
k_1 omjer struja jednopolnog i tropolnog kratkog spoja
k_2 omjer struja dvopolnog i tropolnog kratkog spoja
k_{2z} omjer struja dvopolnog s istodobnim spojem sa zemljom i tropolnog kratkog spoja
l duljina
l duljina voda (poglavlje 4.3)
l duljina uzemljivača (poglavlje 7.10)
m omjer struje praznog hoda i nazivne struje transformatora
m jedna od veličina za određivanje struje mjerodavne za ugrijavanje za vrijeme kratkog spoja (3.210)

m pomoćna veličina pri određivanju otpora i potencijala uzemljenja (poglavlje 7.10)
n strujni višekratnik strujnog transformatora
n jedna od veličina za određivanje struje mjerodavne za ugrijavanje za vrijeme kratkog spoja (3.212)
n broj vodova (poglavlje 4.3)
n broj kvarova (poglavlje 5.2)
n broj odvoda u rasklopnom postrojenju (poglavlje 5.3)
n broj uzemljivača (poglavlje 7.10)
n broj članaka akumulatorske baterije (poglavlje 8.6)
n_d broj uklapanja i isklapanja sklopaka tokom 24 sata (poglavlje 8.7)
n_k broj uklapanja sklopaka nakon kvara (poglavlje 8.7)
n_r broj rastavljača u postrojenju (poglavlje 8.7)
n_s broj sklopaka u postrojenju (poglavlje 8.7)
n_t potreban broj članaka pri trajnom punjenju akumulatorske baterije (poglavlje 8.6)
n_1 broj zavoja primarnog namota (poglavlje 4.4)
n_2 broj zavoja sekundarnog namota
p djelatna snaga u jediničnim vrijednostima
p operator Laplace-ove transformacije
p vjerojatnost prekida pogona zbog kvara na jednom aparatu (poglavlje 5.2)
p prijenosni omjer strujnog transformatora (poglavlje 7)
p tlak zraka (poglavlje 8.7)
p_m prijenosni omjer međutransformatora diferencijalne zaštite
q jalova snaga u jediničnim vrijednostima
q presjek
r djelatni otpor statorskog namota generatora
r udaljenost između elementa vodiča i tačke (poglavlje 4.1)
r broj rastavljača po odvodu (poglavlje 5.3)
r volumen zraka koji može dati rezervoar sklopke pri sniženju tlaka (poglavlje 8.7)
r_l otpor luka
s prividna snaga u jediničnim vrijednostima
s duljina elementa vodiča (poglavlje 4.1)
s broj sklopaka po odvodu (poglavlje 5.3)

s potrebna količina zraka (po satu), koja stalno struji kroz sklopku (poglavlje 8.7)
t vrijeme
t trajanje prekida kao posljedica jednog kvara (poglavlje 5)
t_k vrijeme potrebno za dopunu rezervoara zraka (poglavlje 8.7)
t_p vrijeme od konačnog gašenja luka do pojave maksimalnog prekidnog napona
t_t vrijeme taljenja osigurača
t_u vrijeme od nastanka kratkog spoja do pojave maksimalne struje
u napon u jediničnim vrijednostima
u_k relativni napon kratkog spoja transformatora
u_s napon koraka (poglavlje 7.10)
Δu naponska pogreška naponskog transformatora
$\mathbf{v}_d$ vektor napona direktnog sistema u jediničnim vrijednostima
$\mathbf{v}_i$ vektor napona inverznog sistema u jediničnim vrijednostima
v_l napon luka
v_m momentana vrijednost napona na stezaljkama uzbudnog namota
$\mathbf{v}_o$ vektor napona nultog sistema u jediničnim vrijednostima
v_p prekidni napon (napon među kontaktima nakon gašenja luka)
$\mathbf{v}_R$ vektor napona faze R u jediničnim vrijednostima
$\mathbf{v}_S$ vektor napona faze S u jediničnim vrijednostima
$\mathbf{v}_T$ vektor napona faze T u jediničnim vrijednostima
Δv_p brzina porasta prekidnog napona
x reaktancija u jediničnim vrijednostima
x relativna vrijednost reaktancije
z impedancija u jediničnim vrijednostima
Θ protjecanje statora
Θ_d uzdužna komponenta protjecanja statora
Θ_q poprečna komponenta protjecanja statora
Θ_R protjecanje namota faze R
Φ magnetski tok
Φ_n magnetski tok naponskog elektromagneta brojila
Φ_s magnetski tok strujnog elektromagneta brojila
Φ_{sm} tjemena vrijednost toka statora
α omjer inverzne i direktne impedancije
α recipročna vrijednost vremenske konstante T_{dm}'' (poglavlje 3.6)
α temperaturni koeficijent (poglavlje 4.1)
α konstanta ovisna o mediju za gašenje luka (poglavlje 4.3)

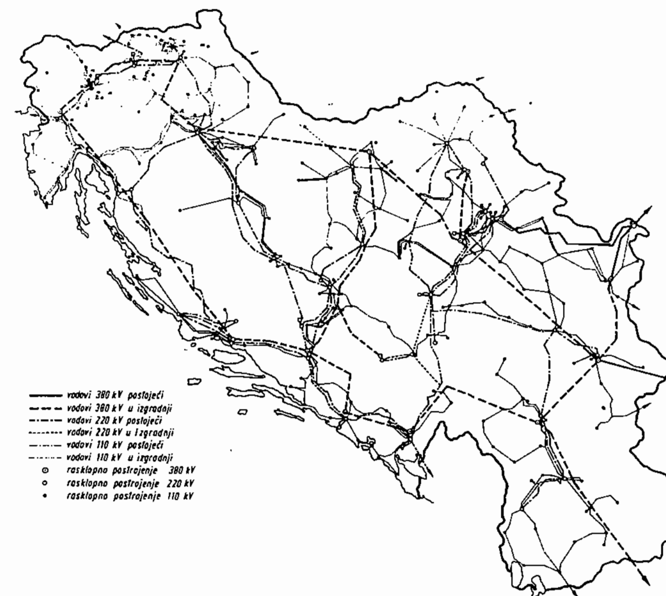
α otklon instrumenta (poglavlje 6)
β omjer inverzne i nulte impedancije
β recipročna vrijednost vremenske konstante T_{dm}' (poglavlje 3.6)
β koeficijent prelaza topline (poglavlje 4.3)
γ recipročna vrijednost vremenske konstante T_{am}
γ omjer između mase umetaka među sastavljenim sabirnicama i samih sabirnica (poglavlje 4.1)
γ faktor amplitude prekidnog napona (poglavlje 4.3)
δ_n povećanje kuta između toka Φ_n i napona u naponskom elektromagnetu brojila
δ_s kut između toka Φ_s i struje u strujnom elektromagnetu brojila
ϑ električni kut zakreta rotora
ϑ temperatura (poglavlje 4)
ϑ vremenska konstanta luka (poglavlje 4.3)
ϑ_t temperatura taljenja vodiča osigurača
$\Delta\vartheta$ dopušteno povišenje temperature
$\varkappa_1$ koeficijent promjene vlastite frekvencije sabirnice zbog postojanja otcjepa (poglavlje 4.1 D)
$\varkappa_2$ koeficijent promjene vlastite frekvencije sabirnice zbog postojanja otcjepa koji nisu u ravnini sabirnica
$\varkappa_3$ koeficijent promjene vlastite frekvencije sabirnice zbog postojanja umetaka
λ omjer između duljinâ vodiča (poglavlje 4.1 D)
μ veličina ovisna o vremenu trajanja kratkog spoja potrebna za određivanje rasklopne struje prema njemačkim propisima
ν omjer stvarne i normalne frekvencije (poglavlje 6)
ν veličina ovisna o vremenu trajanja kratkog spoja potrebna za određivanje rasklopne struje prema američkim propisima
ν_p frekventni faktor potpornih izolatora
ν_S frekventni faktor sabirnica
ϱ specifični otpor
ϱ gustoća (masa po jedinici volumena) (poglavlje 4.1)
ϱ specifični otpor zemlje (poglavlje 7.1)
σ omjer između direktnih reaktancija mreže X_d i X_d''
σ naprezanje (poglavlje 4.1)
σ' omjer između direktnih reaktancija mreže X_d' i X_d''
σ_g omjer između direktnih reaktancija X_{dg} i X_{dg}'' generatora
σ_g' omjer između direktnih reaktancija X_{dg}' i X_{dg}'' generatora
σ_m omjer između direktnih reaktancija X_{dm} mreže i X_{dg}'' generatora
$\sigma_{0,2}$ konvencionalna granica tečenja materijala
φ fazni pomak struje prema naponu
φ momentana vrijednost magnetskog toka (poglavlje 2.3)
φ relativna momentana vrijednost sile među sabirnicama (poglavlje 4.1)
φ potencijal (poglavlje 7.10)
φ_d momentana vrijednost uzdužne komponente toka statora
φ_m momentana vrijednost toka obuhvaćenog namotom uzbude
φ_0 momentana vrijednost nulte komponente toka statora
φ_{pd} momentana vrijednost toka obuhvaćenog uzdužnim prigušnim namotom
φ_{pq} momentana vrijednost toka obuhvaćenog poprečnim prigušnim namotom
φ_q momentana vrijednost poprečne komponente toka statora
φ_{Rd} momentana vrijednost uzdužne komponente toka faze R
φ_{Rq} momentana vrijednost poprečne komponente toka faze R
φ_{Rs} momentana vrijednost toka obuhvaćenog namotom faze R statora
φ_{Ts} momentana vrijednost toka obuhvaćenog namotom T statora
φ_s momentana vrijednost toka statora
φ_{Ss} momentana vrijednost toka obuhvaćenog namotom faze S statora
φ_{1R} momentana vrijednost dijela toka faze R koji se zatvara u statoru
φ_{1SR} momentana vrijednost dijela toka proizvedenog strujom faze R obuhvaćen namotom faze S, koji se zatvara u statoru
φ_{2R} momentana vrijednost dijela toka faze R koji prelazi u rotor
φ_{2SR} momentana vrijednost dijela toka proizvedenog strujom faze R obuhvaćen namotom faze S koji prelazi u rotor
ψ fazni pomak među tokovima brojila
ω kružna frekvencija
ω_p kružna frekvencija prekidnog napona

PRVO POGLAVLJE

OSNOVNO O RASKLOPNIM POSTROJENJIMA

1.1. ZADATAK RASKLOPNIH POSTROJENJA

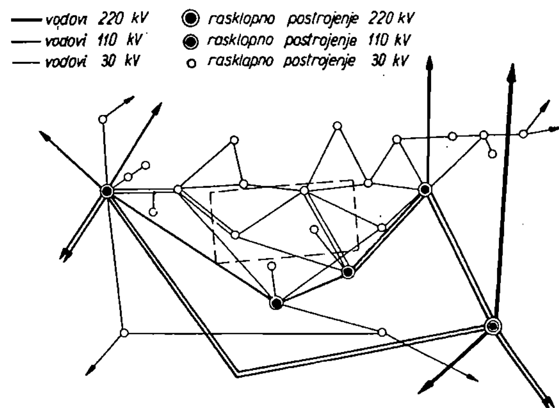
Porast potrošnje električne energije traži izgradnju velikih elektrana i velikih prijenosnih mreža, koje prekrivaju cijele države (sl. 1.1) i koje povezuju države međusobno, razvodnih mreža visokog (sl. 1.2 i 1.3) i niskog napona, koje dolaze i do najmanjih potrošača.



Slika 1.1. Mreža i rasklopna postrojenja 380, 220 i 110 kV na području Jugoslavije (stanje 1973. godine)

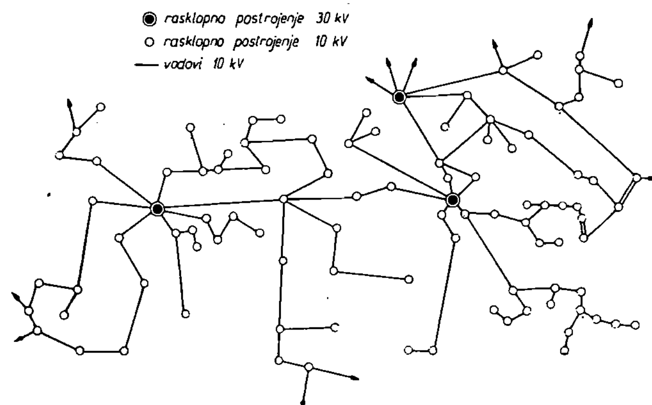
Budući da se radi o visokim naponima i velikim strujama, nije moguće ostvariti razgranjivanje struje i transformaciju bez posebnih postrojenja. Taj zadatak preuzimaju rasklopna postrojenja. U rasklopnom postrojenju

postoje aparati za uklapanje i isklapanje, transformatori, uređaji za zaštitu transformatora i vodova, uređaji za mjerenje radi kontrole pogona i obračuna energije, te uređaji za upravljanje uklopnim aparatima i za signalizaciju stanja pojedinih aparata.



Slika 1.2. Mreža i rasklopna postrojenja 220, 110 i 30 kV na širem području grada (dio mreže sa sl. 1.1.)

Rasklopno postrojenje treba u pravilu da postoji u svakom čvorištu mreže, bez obzira da li u dotičnom čvorištu postoji transformacija. Tako rasklopna postrojenja postoje u elektranama, u kojima im je zadatak da



Slika 1.3. Mreža i rasklopna postrojenja 30 i 10 kV u dijelu grada (dio mreže na sl. 1.2.)

raspodjeljuju energiju proizvedenu u generatorima na vodove koji povezuju elektranu s mrežom. Među rasklopnim postrojenjima u mreži razlikujemo transformatorske stanice, ako u rasklopnom postrojenju, osim čvorišta vodova, postoji i transformacija, i razdjelne stanice, ako je rasklopno postrojenje čvorište vodova istog napona. I u većih potrošača postoje rasklopna postrojenja koja služe za preuzimanje energije iz mreže, za transformaciju i razvod energije.

1.2. IZVEDBE RASKLOPNIH POSTROJENJA

Prema smještaju razlikujemo rasklopna postrojenja unutarnje i vanjske izvedbe. Postrojenja unutarnje izvedbe smještena su u zgradama, najčešće izgrađenim za tu svrhu. Aparati u postrojenjima unutarnje izvedbe zaštićeni su od vanjskih utjecaja (atmosferski, prašina i sl.), pa su pojedini dijelovi (izolatori, kabelske glave i dr.) jednostavnije konstrukcije. Postrojenja unutarnje izvedbe zahtijevaju posebne zgrade, koje u slučaju vrlo visokih napona moraju biti velike, što uvjetuje visoke troškove izgradnje. Zbog toga se pri vrlo visokim naponima prelazi na postrojenja vanjske izvedbe, a elementi postrojenja moraju biti tako konstruirani da mogu ispravno funkcionirati i kad su izloženi vanjskim utjecajima.

Aparati pojedinog dijela rasklopnog postrojenja unutarnje izvedbe mogu biti postavljeni među pregradama, tako da je svaki dio postrojenja smješten u posebnu ćeliju. U nekim slučajevima izvode se postrojenja i bez pregrada. U oba slučaja govorimo o otvorenoj izvedbi rasklopnog postrojenja. Nasuprot tome upotrebljavaju se rasklopna postrojenja zatvorene (ili oklopljene) izvedbe, pri kojoj je cijela ćelija oklopljena limom. Takve ćelije izrađuju se i montiraju u tvornici, a mogu se postaviti bilo u zgradi (npr. u tvorničkim halama), bilo na slobodnom prostoru. O izvedbama rasklopnih postrojenja bit će još govora (poglavlje 9).

1.3. NAPREZANJE U RASKLOPNIM POSTROJENJIMA

Aktivni dijelovi rasklopnih postrojenja nalaze se pod naponom i kroz vodiče teku struje. Rasklopno postrojenje treba da bude tako izrađeno i tako održavano da ne dođe do oštećenja djelovanjem napona bilo između vodiča, bilo između vodiča i uzemljenih dijelova, a niti djelovanjem velikih struja koje se — pogotovo u slučaju kratkog spoja — mogu pojaviti u vodičima. Osim toga treba aparate koji se ugrađuju u rasklopna postrojenja tako odabrati, da mogu izdržati i djelovanje napona i djelovanje struje.

A. Naponi

Za elektrifikaciju upotrebljava se trofazni sistem, pa kad se govori o naponu uvijek se misli — ako nije drukčije spomenuto — na efektivnu vrijednost linijskog napona.

Razlikujemo nazivni napon mreže i najviši napon mreže. Nazivni napon mreže jest prema definiciji konvencionalna vrijednost napona po kojemu je nazvana mreža. Ako je npr. nazivni napon mreže 10 kV, ne znači da i stvarni napon mreže mora biti tačno 10 kV; on može biti i viši i niži od 10 kV, a različit je u pojedinim tačkama mreže. Najviši napon

mreže jest najviša vrijednost napona, koja se u normalnim pogonskim uvjetima pojavljuje u bilo kojem trenutku i na bilo kojoj tački mreže. Ta vrijednost ne uzima u obzir prolazne promjene napona zbog smetnji i zbog naglog isklapanja velikih opterećenja. Podatak o najvišem naponu važniji je od nazivnog napona, jer on služi za utvrđivanje nivoa izolacije.

TABLICA 1.1.

Standardni naponi električnih mreža u Jugoslaviji s naponom iznad 1 kV

Nazivni napon kV	3*	6*	10	20**	35	60**	110	220	380
Najviši napon kV	3,6*	7,2*	12	24**	38	72,5**	123	245	420

* Nije dopuštena upotreba za javnu elektrifikaciju. Dolazi u obzir kao generatorski napon, te za industrijske i rudarske pogone.
** Može se upotrebljavati samo izuzetno, ako je upotrebu moguće opravdati ekonomskim razlozima.

Nazivni i najviši naponi mreža utvrđeni su standardima u pojedinim zemljama. U tab. 1.1. navedeni su naponi prema jugoslavenskom standardu, dok su u tab. 1.2. navedeni nazivni (tri niza) i najviši naponi mreže prema preporuci Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC). Tri niza nazivnih

TABLICA 1.2.

Nazivni i najviši naponi mreža prema IEC
(Internacionalna elektrotehnička komisija)

Nazivni naponi mreže (kV)			Najviši naponi mreže (kV)
Niz I	Niz II	Niz III	
3	3,3		3,6
6	6,6		7,2
10	11		12
15			17,5
20	22		24
30	33		36
45	44		52
60	66	69	72
80	88	90	100
100	110	115	123
120	132	138	145
150	161		170
220	225	230	245
275	287,5		300
380			420

napona uvedena su u preporuku da bi se uvažilo stanje u pojedinim zemljama, dok je — kao najvažniji podatak za međunarodnu unifikaciju — preporučen samo jedan niz najviših napona. U Jugoslaviji standardizirani su naponi prvog niza, osim napona **110 kV** iz drugog niza, a uveden je napon 35 kV (najviši 38 kV), kojeg nema ni u jednom od nizova preporučenih od IEC.

Nije međutim dovoljno samo definirati najviši napon mreže, jer se u mreži pojavljuju i znatno viši naponi radi prelaznih pojava, pri isklapanju,

atmosferskom pražnjenju i sl., pa izolacija mora biti sposobna da izdrži i znatno više napone, jer bi u protivnom slučaju svaka takva pojava izazvala kvar u postrojenju. Zbog toga su standardizirani i ispitni naponi koje mora izdržati ispitivani aparat ili element postrojenja. Skup mjera za sprečavanje štete zbog povišenja napona naziva se koordinacija izolacije, koja se provodi tako da se preskoci lokaliziraju na mjestu gdje neće nanijeti štetu, ako se ekonomičnim sredstvima ne mogu sasvim ukloniti. Da se to postigne, određuje se stupanj izolacije aparata i uređaja, koji je definiran vrijednošću podnosivih napona koji karakteriziraju izolaciju tog aparata ili uređaja s obzirom na njihovu dielektričnu čvrstoću. U tab. 1.3. navedeni su podnosivi naponi prema jugoslavenskom standardu, koji u potpunosti odgovaraju preporukama IEC. Treba napomenuti da su za najviši napon od 38 kV (nema ga u preporukama IEC) u jugoslavenskom standardu prihvaćeni podnosivi naponi koji odgovaraju najvišem naponu mreže od 36 kV prema preporukama IEC. Stupanj izolacije odgovara najvišem naponu mreže. Za najviše napone mreže 123 i 245 kV treba razlikovati puni stupanj i smanjeni stupanj izolacije (oznaka *s* uz stupanj izolacije). Aparate i uređaje sa smanjenim stupnjem izolacije upotrebljava se u mrežama s neposredno uzemljenom nul-tačkom. Za najviši napon mreže od 420 kV predviđen je samo smanjeni stupanj izolacije.

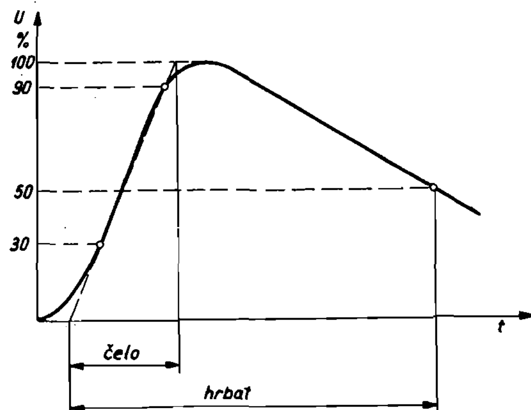
TABLICA 1.3.

Podnosivi naponi prema jugoslavenskom standardu

Stupanj izolacije kV	Standardni podnosivi naponi				Povišeni standardni podnosivi napon	
	Podnosivi naponi kroz 1 min.		Podnosivi udarni naponi		Podnosivi napon kroz 1 min	Podnosivi napon udarni
	puni stupanj izolacije kV	smanjeni stupanj izolacije kV	puni stupanj izolacije kV	smanjeni stupanj izolacije kV	puni stupanj izolacije kV	puni stupanj izolacije kV
3,6	16	—	45	—	21	45
7,2	22	—	60	—	27	60
12	28	—	75	—	35	75
24	50	—	125	—	55	125
36	70	—	170	—	75	170
72,5	140	—	325	—	—	—
123	230	—	550	—	—	—
123 s	—	185	—	450	—	—
245	460	—	1050	—	—	—
245 s	—	395	—	900	—	—
420 s	—	(630)	—	(1425)	—	—

Podnosivi napon za vrijeme 1 min jest najviši napon frekvencije 50 Hz koga uređaj mora izdržati 1 minutu a da ne dođe do proboja ili preskoka pri ispitivanju uz standardne atmosferske prilike (760 mm stupca žive, 20^0C, 11 g vodene pare po m^3 zraka). Podnosivi napon efektivna je vrijednost napona. Uređaji predviđeni za upotrebu na slobodnom prostoru ispituju se na kiši (tipsko ispitivanje) i u suhom (komadno ispitivanje).

Osim napona frekvencije 50 Hz, uređaj mora podnijeti ispitivanje udarnim naponom, čiji je oblik definiran na sl. 1.4. Nagao porast napona naziva se čelo, a njegovo trajanje određeno je spojnicom tačaka za koje napon iznosi 30%, odnosno 90% tjemene vrijednosti. Trajanje čela prema preporuci IEC treba da iznosi 1,2 µs. Smanjenje napona naziva se hrbat, a njegovo trajanje do smanjenja na 50% tjemene vrijednosti prema istim preporukama treba da iznosi 50 µs. Oznaka je za udarni napon takvog oblika: 1,2/50 µs. Takav oblik udarnog napona propisuje naš standard. Podnosivi udarni napon naveden u tab. 1.3. tjemena je vrijednost udarnog napona koji mora ispitivani uređaj izdržati a da ne dođe do proboja ili preskoka uz standardne atmosferske prilike. Izolacija uređaja ispituje se sa 5 udara. Izolacija je dobra ako ne nastane nijedan preskok, a loša ako



Slika 1.4. Standardni oblik udarnog napona

nastanu dva ili više preskoka. Ako dođe do preskoka samo jednom, ispitivanje se ponavlja sa još 10 udara. Izdrži li izolacija svih 10 udara, smatra se da je zadovoljila zahtjevima; ako nastane samo jedan preskok, ne zadovoljava. Ispitivanje udarnim naponom uvijek se izvodi u suhom, bez obzira da li uređaj služi za rasklopna postrojenja unutarnje ili vanjske izvedbe.

Povišeni standardni podnosivi napon dolazi u prvom redu u obzir za uređaje i aparate izložene atmosferskim prenaponima.

Standardni podnosivi naponi za mreže s najvišim naponom 420 kV navedeni su u tab. 1.3. prema preporukama IEC, jer ih jugoslavenski standard ne propisuje.

Njemački propisi predviđaju nešto drukčije najviše napone mreže i podnosive napone (tab. 1.4). Treba razlikovati podnosive udarne napone oblika prema sl. 1.4, ali trajanja 1/50 µs, i podnosive udarne napone odrezanog vala.

Prilikom ispitivanja standardnim udarnim naponom izolacija zadovoljava ako pri 5 udara ne nastane preskok ili ako do preskoka dođe samo jednom, no nakon daljnjih 5 udara ne smije doći do preskoka. Ispitivanje

TABLICA 1.4.

Nazivni, najviši i podnosivi naponi prema njemačkim propisima

Nazivni napon kV	Najviši napon kV	Zaštitni nivo odvodnika prenapona kV	Podnosivi udarni napon: za val 1/50 µs	Podnosivi udarni napon: odrezani val	Podnosivi napon kroz 1 min: A rastavišta rastavljača kV	B izolatori i aparati kV	C transf. kondenzatori kV	D kabeli kV	E izolatori za nadzemne vodove
1	1,15	5	20	23	15	10	3,5	—	—
3	3,5	13	45	52	25	22	10	6	21
6	7	26	60	70	35	33	24	11	27
10	11,5	40	75	85	45	42	30	17	35
15	17,5	60	95	100	60	53	40	25	45
20	23	80	125	145	75	64	50	30	55
30	35	120	170	195	100	86	70	45	75
45	52	175	250	290	145	119	90	70	105
60	70	235	325	375	190	152	120	90	140
110 s	125	330	450	520	250	210	175	—	185
110	125	415	550	630	310	262	220	—	230
150 s	170	450	650	750	370	280	240	—	275
150	170	565	750	860	440	350	300	—	325
220 s	250	660	900	1040	535	405	355	—	395
220	250	825	1050	1200	620	505	440	—	460
300 s	330	875	1150	1320	750	545	480	—	510
380 s	420	1110	1425	1640	900	750	640	—	630

TABLICA 1.5.

Najmanji razmaci dijelova pod naponom (prema »Tehničkim propisima za izvođenje postrojenja jake struje za pogonski napon iznad 1000 V«)

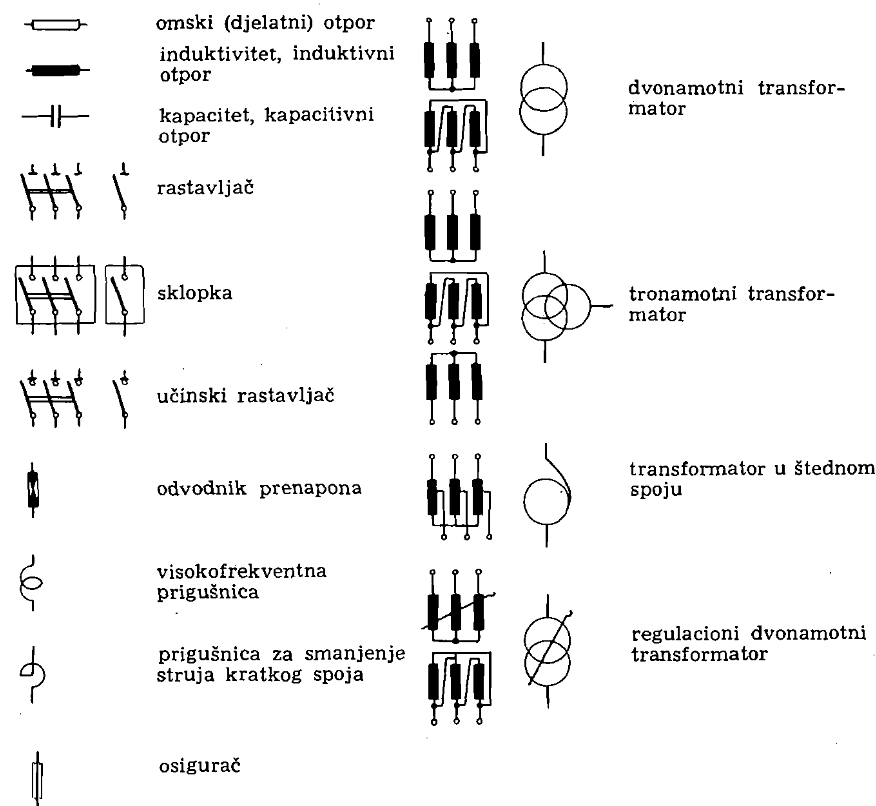
Nazivni napon kV	Najmanji razmak dijelova pod naponom: u zgradi mm	na otvorenom mm
1	40	—
3	75	—
6	100	—
10	125	180
20	180	260
35	300	400
60	470	580
110	800	1000
220	—	2200

se odnosi na izolaciju u zraku, između vodiča i zemlje. Na taj način ispituju se npr. potporni i provodni izolatori, izolatori za nadzemne vodove, sklopke, otvoreni kontakti sklopaka i rastavljača itd.

S odrezanim valom ispituje se sa 6 udarnih valova ovim redom: 2 puna udarna vala 1/50 μs, 2 odrezana vala, kojih je tjemena vrijednost jednaka vrijednostima u tab. 1.4, ali je paralelno iskrište na ispitivanom aparatu udešeno tako da probije u razmaku od 2 do 4 mikrosekunde, te 2 puna udarna vala 1/50 μs. Prilikom ispitivanja s punim udarnim valovima iskrište je razmaknuto da ne nastane proboj. Ni pri jednom od 6 udara ne smije nastati preskok, odnosno proboj u unutrašnjosti ispitivane naprave. Takvo ispitivanje odnosi se na krute, tekuće i stlačene izolacije (npr unutarnja izolacija transformatora, kabela, kondenzatora) i na sve zatvorene i teško pristupačne preskočne staze u zraku, na prekidna mjesta rastavljača, sklopaka, osigurača i sl.

Za ispitivanje izmjeničnim naponom frekvencije 50 Hz određeni su podnosivi naponi u ovisnosti o ispitivanom uređaju ili aparatu.

Da bi se osigurala postrojenja od preskoka između faza i između neke od faza i uzemljenih dijelova, propisani su (tab. 1.5) najmanji međusobni razmaci faza ili najmanji razmaci između neke od faza i uzemljenih dijelova. Razmaci u tab. 1.5. vrijede za dijelove postrojenja koja se ne ispituju podnosivim naponima. Spomenuti razmaci ne vrijede npr. za sklopke, rastavljače i sl. koji su ispitani na propisani podnosivi napon.



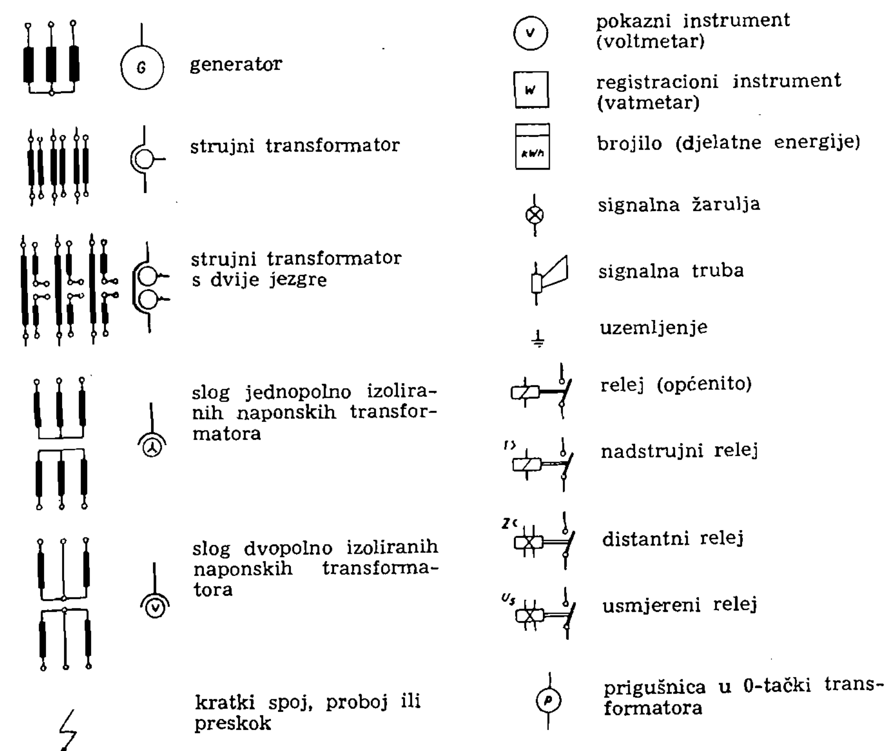
Slika 1.5. Upotrebljeni grafički simboli

B. Struje

Pri izboru aparata i dimenzioniranju dijelova rasklopnih postrojenja treba razlikovati nazivnu struju i struje za vrijeme kratkog spoja.

Nazivna struja je ona koja može neograničeno dugo vremena teći kroz aparat, stroj ili vodič, a da ne dođe do njihova oštećenja. To međutim ne znači da u normalnom pogonu za neko kraće vrijeme ne smije kroz spomenute dijelove postrojenja teći i veća struja od nazivne bez opasnosti da dođe do oštećenja.

U slučaju kratkog spoja razlikujemo udarnu struju kratkog spoja, rasklopnu struju i struju mjerodavnu za ugrijavanje za vrijeme kratkog spoja. Veličina tih struja ovisi o mreži u kojoj će biti izgrađeno rasklopno



Slika 1.5. (nastavak). Upotrebljeni grafički simboli

postrojenje, pa je potrebno za svako takvo postrojenje posebno, pa i za svaki dio postrojenja, odrediti vrijednosti struja kratkog spoja. Zbog toga se za struje kratkog spoja ne mogu donijeti neki propisi analogni onima za napone. Određivanje struja kratkog spoja opširno je prikazano u drugom i trećem poglavlju.

1.4. GRAFIČKI SIMBOLI

Aparati, te mjerni i zaštitni uređaji, prikazani su u shemama spoja grafičkim simbolima.

Na sl. 1.5. prikazani su glavni grafički simboli onako kako su upotrebljeni u shemama spoja. Gdje je bilo potrebno, pored simbola koji se upotrebljavaju u jednopolnim shemama, naveden je i simbol za tropolnu shemu.

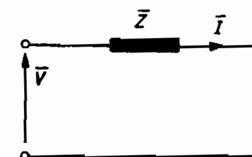
DRUGO POGLAVLJE

REAKTANCIJE U EKVIVALENTNIM SHEMAMA ZA ODREĐIVANJE STRUJA KRATKOG SPOJA

2.1. SIMETRIČNE KOMPONENTE

A. Simetrični trofazni sistemi

Danas praktički svi elektroenergetski sistemi rade kao trofazne mreže. U normalnom pogonu mreža se sastoji od jednakih elemenata u svim fazama, a opterećenja su praktički također simetrična. Radi toga je dovoljno — s tačnošću koja zadovoljava — račun prilika u normalnom pogonu mreže provesti za jednu od faza pomoću ekvivalentne jednofazne sheme (sl. 2.1). Takva shema naime daje potpunu sliku trofaznog simetričnog



Slika 2.1. Ekvivalentna jednofazna shema trofaznog simetričnog sistema

sistema, koji u svim trim fazama ima jednake impedancije **Z**, kroz koje teku po apsolutnom iznosu jednake struje **I**, jer na impedanciju djeluju — opet po apsolutnom iznosu — jednaki naponi **V** (između nul-tačke i faze). Naravno da je napon **V** fazni napon u trofaznom sistemu. Sve veličine izračunate za jednu fazu vrijede i za ostale dvije faze, uzimajući pri tom u obzir da su naponi i struje međusobno pomaknuti za kut od 120^0, odnosno za $\frac{2\pi}{3}$

Sl. 2.2. prikazuje struje u fazama R, S i T u trofaznom simetričnom sistemu. Struja u fazi S zaostaje za strujom u fazi R za $\frac{2\pi}{3}$, dok struja u fazi T isto toliko zaostaje za strujom u fazi S. Budući da se radi o sinusnoj struji za momentanu vrijednost struje u fazi R, možemo pisati

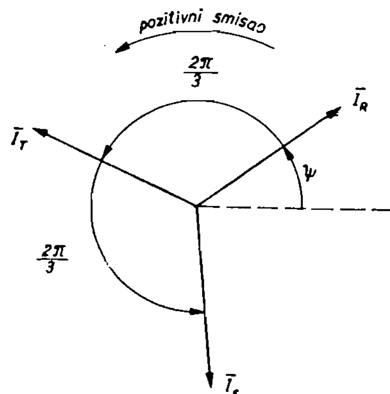
$$i_R = I\sqrt{2}\sin(\omega t + \psi) \qquad \ldots (2.1a)$$

gdje je I efektivna vrijednost struje, ω kružna frekvencija, a ψ označava položaj vektora I_R u momentu $t = 0$. Kad uzmemo u obzir sl. 2.2. za momentane vrijednosti struja u fazama S i T, dobivamo

$$i_S = I\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3}\right) \qquad \dots (2.1b)$$

$$i_T = I\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \psi - \frac{4\pi}{3}\right) \qquad \dots (2.1c)$$

Postavljeno je $I = I_R = I_S = I_T$, jer su efektivne vrijednosti struja u svim trim fazama međusobno jednake.



Slika 2.2. Struje u trofaznom simetričnom sistemu

Sinusnu funkciju možemo prikazati u kompleksnoj ravnini vektorom modula I i argumenta φ, pa za struju u fazi R imamo

$$\mathbf{I}_R = I(\cos\psi + \mathrm{j}\sin\psi) \qquad \dots (2.2a)$$

dok za struje u ostalim dvjema fazama dobivamo

$$\mathbf{I}_S = I\left[\cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) + \mathrm{j}\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \qquad \dots (2.2b)$$

$$\mathbf{I}_T = I\left[\cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) + \mathrm{j}\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right)\right] \qquad \dots (2.2c)$$

jer je za struju u fazi R argument $\varphi = \psi$, a u ostalim fazama $\varphi = \psi - \frac{2\pi}{3}$, odnosno $\varphi = \psi - \frac{4\pi}{3}$. Izraze (2.2) možemo pisati i na slijedeći način

$$\mathbf{I}_R = I\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\psi} = I\underline{/\psi} \qquad \dots (2.3a)$$

$$\mathbf{I}_S = I\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\psi - 2\pi/3)} = I\underline{/\psi - 2\pi/3} \qquad \dots (2.3b)$$

$$\mathbf{I}_T = I\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\psi - 4\pi/3)} = I\underline{/\psi - 4\pi/3} \qquad \dots (2.3c)$$

Uvedimo još operator a, koji ima vrijednost

$$a = 1\underline{/2\pi/3} = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\,2\pi/3} =$$

$$= \cos\frac{2\pi}{3} + \mathrm{j}\sin\frac{2\pi}{3} = -0{,}500 + \mathrm{j}\,0{,}866 \qquad \dots (2.4)$$

Množenje s operatorom a znači dakle zakretanje vektora za kut $\frac{2\pi}{3}$ (120°) u pozitivnom smislu (sl. 2.2). Polazeći od (2.4) možemo odrediti i vrijednost potencija operatora a. Tako je

$$a^2 = (\mathrm{e}^{\mathrm{j}\,2\pi/3})^2 = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\,4\pi/3} =$$

$$= \cos\frac{4\pi}{3} + \mathrm{j}\sin\frac{4\pi}{3} = -0{,}500 - \mathrm{j}\,0{,}866, \qquad \dots (2.5)$$

Dalje je

$$a^3 = (e^{\mathrm{j}2\pi/3})^3 = e^{\mathrm{j}6\pi/3} = e^{\mathrm{j}2\pi} =$$

$$= \cos 2\pi + \mathrm{j}\sin 2\pi = 1 \qquad \dots (2.6)$$

Za a^4 možemo postaviti

$$a^4 = (\mathrm{e}^{\mathrm{j}\,2\pi/3})^4 = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\,8\pi/3} = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\,(2\pi + 2\pi/3)} =$$

$$= \cos\left(2\pi + \frac{2\pi}{3}\right) + \mathrm{j}\sin\left(2\pi + \frac{2\pi}{3}\right) =$$

$$= \cos\frac{2\pi}{3} + \mathrm{j}\sin\frac{2\pi}{3} = a \qquad \dots (2.7)$$

Analogno dobivamo za više potencije, pa je

$$1 = a^0 = a^3 = a^6 = \dots\dots = a^{3n} \qquad \dots (2.8a)$$

$$a = a^4 = a^7 = \dots\dots = a^{(3n+1)} \qquad \dots (2.8b)$$

$$a^2 = a^5 = a^8 = \dots\dots = a^{(3n+2)} \qquad \dots (2.8c)$$

Na isti način kao što se određuju vrijednosti za pozitivne potencije, mogu se odrediti i vrijednosti za negativne potencije, pa je $a^{-1} = a^2$, $a^{-2} = a$ i $a^{-3} = 1$, jer se npr. zakretanjem za $-\frac{2\pi}{3}$ i zakretanjem za $\frac{4\pi}{3}$ dolazi do istog položaja vektora. Prema tome opći izrazi (2.8) vrijede za svaki cijeli pozitivni ili negativni broj.

Uzmemo li dakle u obzir (2.3) i (2.8), možemo napisati izraze za struje u ovom obliku

$$\mathbf{I}_R = I\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\psi} \qquad \dots (2.9a)$$

$$\mathbf{I}_S = I\,e^{\mathrm{j}\psi}\,e^{-\mathrm{j}2\pi/3} = a^2 I\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\psi} = a^2\,\mathbf{I}_R \qquad \dots (2.9b)$$

$$\mathbf{I}_T = I\,e^{\mathrm{j}\psi}\,e^{-\mathrm{j}4\pi/3} = a\,I\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\psi} = a\,\mathbf{I}_R \qquad \dots (2.9c)$$

Kao što je poznato, u simetričnom je trofaznom sistemu

$$\mathbf{I}_R + \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T = 0 \qquad \ldots (2.10)$$

pa uvrštavanjem vrijednosti iz (2.9) dobivamo

$$\mathbf{I}_R (1 + a + a^2) = 0 \qquad \ldots (2.11)$$

što je i ispunjeno, jer je

$$1 + a + a^2 = 0 \qquad \ldots (2.12)$$

što se može i pokazati uvrštavanjem vrijednosti iz (2.4) i (2.5).

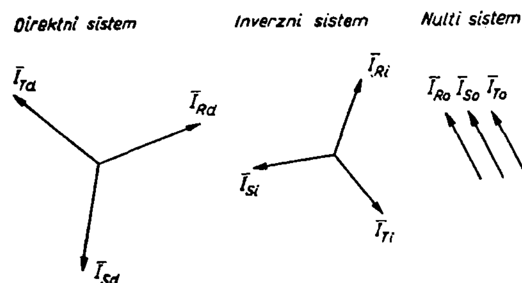
B. Nesimetrični trofazni sistem

Ako se opterećenje faza međusobno razlikuje, govorimo o nesimetričnom sistemu. To može biti posljedica nejednakih impedancija u pojedinim fazama ili nejednakih elektromotornih sila, odnosno to može biti posljedica i nejednakih impedancija i elektromotornih sila. No u velikoj većini praktičkih slučajeva možemo međutim pretpostaviti da su u normalnom pogonu sve tri faze jednako opterećene (iznimke su sistemi sa znatnim udjelom jednofaznih lučnih peći u elektrometalurškoj industriji) i da su impedancije faza međusobno jednake. Nasuprot tome u slučaju kvara u mreži (npr. kratak spoj između dvije faze) dolazi do nesimetričnih opterećenja, pa da bismo upoznali prilike za vrijeme kvara, neophodno moramo poznavati metode proračuna nesimetričnih sistema.

U nesimetričnom sistemu nije moguće prilike u mreži odrediti promatranjem stanja samo u jednoj fazi, pa nije moguće ni trofaznu mrežu neposredno zamijeniti s ekvivalentnom jednofaznom shemom. S druge pak strane, određivanje prilika u nesimetričnom sistemu na osnovu trofazne sheme zahtijevalo bi duge račune. Rastavljanjem trofaznog nesimetričnog sistema u tri simetrična trofazna sistema, koja se mogu prikazati sa tri jednofazne sheme, postiže se međutim znatno pojednostavnjenje računa.

Može se pokazati da se tri kakva god vektora mogu zamijeniti sa tri sistema vektora (sl. 2.3):

trofaznim simetričnim sistemom s redoslijedom faza kao u simetričnom trofaznom sistemu — nazovimo ga direktnim sistemom,



Slika 2.3. Simetrične komponente

trofaznim simetričnim sistemom s obrnutim redoslijedom faza od onog u simetričnom trofaznom sistemu — nazovimo ga inverznim sistemom.

trima vektorima istog modula i istog argumenta — nazovimo ga nultim sistemom.

Upotrebom operatora a možemo prikazati veličine u direktnom sistemu izrazima

$$\mathbf{I}_{Rd} = \mathbf{I}_d \qquad \ldots (2.13a)$$

$$\mathbf{I}_{Sd} = a^2 \mathbf{I}_d \qquad \ldots (2.13b)$$

$$\mathbf{I}_{Td} = a \mathbf{I}_d \qquad \ldots (2.13c)$$

Za inverzni sistem vrijede relacije

$$\mathbf{I}_{Ri} = \mathbf{I}_i \qquad \ldots (2.14a)$$

$$\mathbf{I}_{Si} = a \mathbf{I}_i \qquad \ldots (2.14b)$$

$$\mathbf{I}_{Ti} = a^2 \mathbf{I}_i \qquad \ldots (2.14c)$$

dok za nulti sistem vrijedi

$$\mathbf{I}_{Ro} = \mathbf{I}_{So} = \mathbf{I}_{To} = \mathbf{I}_o \qquad \ldots (2.15)$$

U (2.13) struja direktnog sistema u fazi R označena je samo sa $\mathbf{I}_d$ bez oznake faze. To je učinjeno i za struje inverznog i nultog sistema. Prema tome $\mathbf{I}_d$, $\mathbf{I}_i$ i $\mathbf{I}_o$ znače struje direktnog, inverznog, odnosno nultog sistema u fazi R. Takvo označavanje zadržat ćemo i u daljnjim razmatranjima.

Zbrajanjem triju komponenata jedne faze dobivamo stvarnu veličinu — u našem slučaju struju — u toj fazi. Prema tome je

$$\mathbf{I}_R = \mathbf{I}_d + \mathbf{I}_i + \mathbf{I}_o \qquad \ldots (2.16a)$$

$$\mathbf{I}_S = a^2 \mathbf{I}_d + a \mathbf{I}_i + \mathbf{I}_o \qquad \ldots (2.16b)$$

$$\mathbf{I}_T = a \mathbf{I}_d + a^2 \mathbf{I}_i + \mathbf{I}_o \qquad \ldots (2.16c)$$

Iz relacija (2.16) određujemo izraze pomoću kojih možemo za zadane struje (ili napone) u pojedinim fazama odrediti simetrične komponente struja (ili napona).

Ako zbrojimo tri jednadžbe (2.16) dobivamo

$$3\,\mathbf{I}_o = (\mathbf{I}_R + \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T) - (\mathbf{I}_d + \mathbf{I}_i)(1 + a + a^2) \qquad \ldots (2.17)$$

a uzmemo li u obzir (2.12), za nultu komponentu imamo

$$\mathbf{I}_o = \frac{1}{3} (\mathbf{I}_R + \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T) \qquad \ldots (2.18a)$$

Da odredimo direktnu komponentu, pomnožimo (2.16b) sa a, a (2.16c) sa a^2, te zbrojimo te dvije jednadžbe sa (2.16a). Tada dobivamo

$$\mathbf{I}_d = \frac{1}{3} (\mathbf{I}_R + a\,\mathbf{I}_S + a^2 \mathbf{I}_T) \qquad \ldots (2.18b)$$

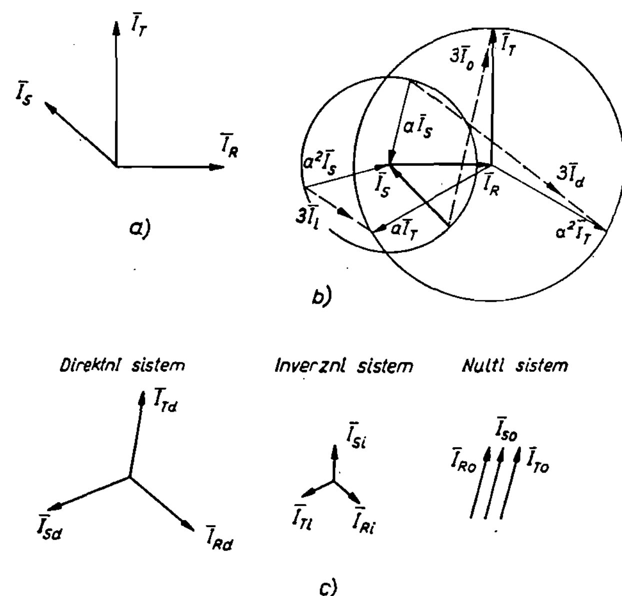
pri čemu je uzeta u obzir relacija (2.12), te da je $a^3 = 1$ i $a^4 = a$.

Pri određivanju inverzne komponente množimo (2.16b) sa a^2, a (2.16c) sa a, pa iz zbroja tih jednadžba sa (2.16c) dobivamo

$$\mathbf{I}_i = \frac{1}{3}\left(\mathbf{I}_R + a^2\,\mathbf{I}_S + a\,\mathbf{I}_T\right) \qquad \ldots (2.18c)$$

Pomoću izraza (2.18) mogu se dakle odrediti simetrične komponente nesimetričnog trofaznog sistema, a pomoću izraza (2.16) struje u fazama pomoću simetričnih komponenata.

Na sl. 2.4. prikazano je grafičko određivanje simetričnih komponenata, koje se osniva na izrazima (2.18). Prikazana konstrukcija donekle pojednostavnjuje grafičko određivanje. Najprije se ucrta struja u fazi S, na nju struja u fazi R, a na ovu struja u fazi T. Zbroj struja — prema

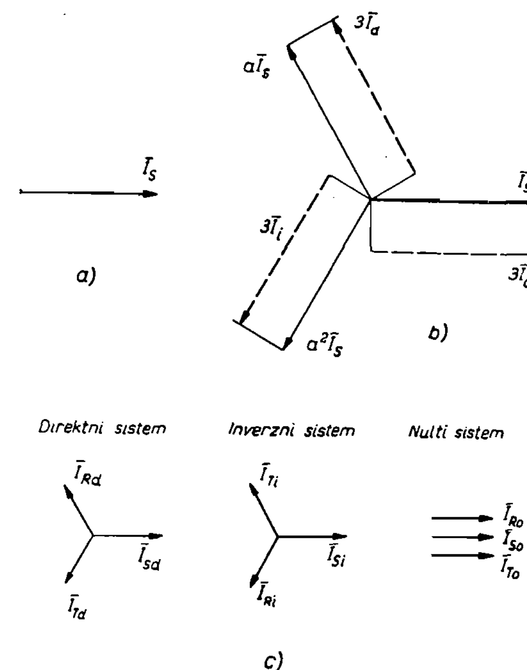


Slika 2.4. Primjer određivanja simetričnih komponenata

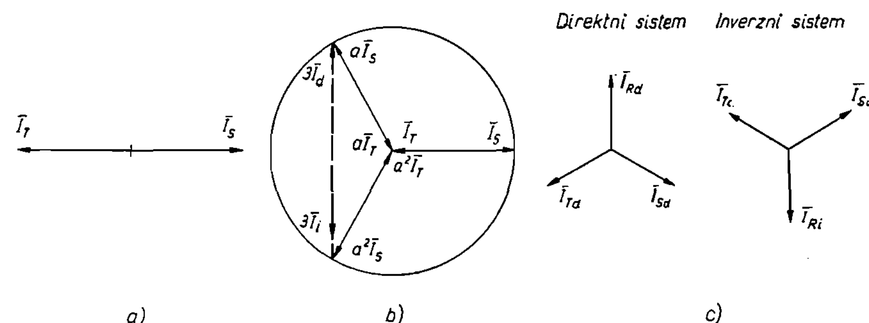
(2.18a) — prikazuje trostruku vrijednost nulte komponente $\mathbf{I}_o$. Da se odredi direktna i inverzna komponenta, nacrtaju se krugovi oko vrha struje $\mathbf{I}_S$ i početka struje $\mathbf{I}_T$, što omogućava jednostavno određivanje vektora $a\mathbf{I}_S$ i $a^2\mathbf{I}_S$ odnosno vektora $a\mathbf{I}_T$ i $a^2\mathbf{I}_T$. Spajanjem početka vektora $a\mathbf{I}_S$ s krajem vektora $a^2\mathbf{I}_T$ dobivamo trostruku direktnu komponentu, jer ona predstavlja zbroj vektora $a\mathbf{I}_S$, $\mathbf{I}_R$ i $a^2\mathbf{I}_T$, a to je baš $3\mathbf{I}_d$ (2.18b). Spajanjem početka vektora $a^2\mathbf{I}_S$ s krajem vektora $a\mathbf{I}_T$, dobivamo trostruku inverznu komponentu, jer je to upravo — prema (2.18c) — $3\mathbf{I}_i$. Poznavajući veličinu i smjer $3\mathbf{I}_d$, $3\mathbf{I}_i$ i $3\mathbf{I}_o$ možemo nacrtati direktni, inverzni i nulti sistem simetričnih komponenata, s tim — kako je već naglašeno — da smjer određenih komponenata odgovara smjeru u fazi R.

Na sl. 2.5. i 2.6. određene su — radi primjera — simetrične komponente za jednofazno i dvofazno opterećenje.

Nulta komponenta može se pojaviti samo onda kad je suma struja u fazama različita od nule (sl. 2.4. i 2.5), a to se može dogoditi kad osim triju faza postoji mogućnost zatvaranja strujnog kruga i preko četvrtog voda (nulti vodič, uzemljenje).



Slika 2.5. Određivanje simetričnih komponenata za slučaj jednofaznog opterećenja



Slika 2.6. Određivanje simetričnih komponenata za slučaj dvofaznog opterećenja

Naravno da se određivanje simetričnih komponenata može provesti i analitički, koristeći opet izraze (2.18).

Da to ilustriramo, poslužimo se primjerom na sl. 2.4. Struje u fazama su

$$\mathbf{I}_R = 30{,}00\ (\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) = 30{,}00$$
$$\mathbf{I}_S = 25{,}00\ (\cos 135^\circ + j \sin 135^\circ) = -17{,}68 + j\,17{,}68$$
$$\mathbf{I}_T = 40{,}00\ (\cos 90^\circ + j \sin 90^\circ) = j\ 40{,}00$$

Iz relacije (2.18a) dobivamo

$$\mathbf{I}_o = \frac{1}{3}\ (30{,}00 - 17{,}68 + j\,17{,}68 + 40{,}00) =$$
$$= 4{,}12 + j\,19{,}22 = 19{,}66\ \underline{/77^\circ\,52'}$$

Da bismo odredili direktnu komponentu prema (2.18b), izračunajmo najprije slijedeće veličine

$$a\,\mathbf{I}_S = 25{,}00\,\underline{/135^\circ + 120^\circ} = 25{,}00\,\underline{/255^\circ} =$$
$$= 25{,}00\ (\cos 255^\circ + j \sin 255^\circ) =$$
$$= -6{,}47 - j\ 24{,}15$$

$$a^2\mathbf{I}_T = 40{,}00\,\underline{/90^\circ + 240^\circ} = 40{,}0\,\underline{/330^\circ} =$$
$$= 40{,}00\ (\cos 330^\circ + j \sin 330^\circ) =$$
$$= 34{,}64 - j\ 20{,}00$$

Uvrštavanjem u (2.18b) dobivamo

$$\mathbf{I}_d = \frac{1}{3}\ (30{,}00 - 6{,}47 - j\,24{,}15 + 34{,}64 - j\,20{,}00) =$$
$$= 19{,}39 - j\,14{,}72 = 24{,}34\,\underline{/322^\circ\,48'}$$

Da bismo odredili inverznu komponentu prema (2.18c), izračunajmo veličine

$$a^2\mathbf{I}_S = 25{,}00\,\underline{/135^\circ + 240^\circ} = 25{,}00\,\underline{/375^\circ} = 25{,}00\ \underline{/15^\circ} =$$
$$= 25{,}00\ (\cos 15^\circ + j \sin 15^\circ) =$$
$$= 24{,}15 + j\ 6{,}47$$

$$a\,\mathbf{I}_T = 40{,}00\,\underline{/90^\circ + 120^\circ} = 40{,}00\,\underline{/210^\circ} =$$
$$= 40{,}00\ (\cos 210^\circ + j \sin 210^\circ) =$$
$$= -34{,}64 - j\ 20{,}00$$

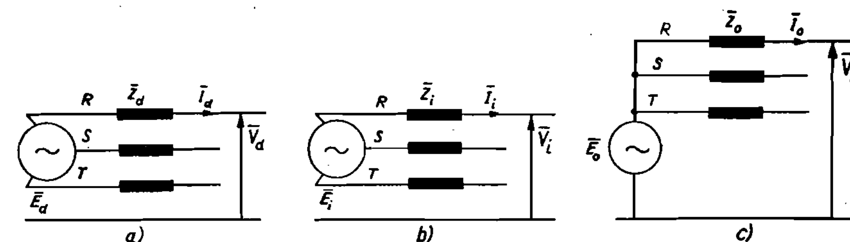
Dakle, prema (2.18c) dobivamo

$$\mathbf{I}_i = \frac{1}{3}\ (30{,}00 + 24{,}15 + j\,6{,}47 - 34{,}64 - j\,20{,}00) =$$
$$= 8{,}50 - j\ 4{,}51 = 9{,}62\,\underline{/332^\circ\ 3'}$$

U dosadašnjim razmatranjima prikazani su odnosi za struje; izvedeni odnosi međutim vrijede i za napone i za elektromotorne sile u trofaznom sistemu.

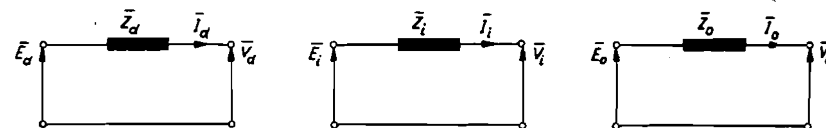
C. Ekvivalentne jednofazne sheme

Rastavljanjem na simetrične komponente moguće je prilike u nesimetričnom sistemu prikazati sa tri trofazna sistema (sl. 2.7). Tada je moguće



Slika 2.7. Trofazne sheme sistema simetričnih komponenata

definirati impedancije, koje nazivamo direktnom ($\mathbf{Z}_d$), inverznom ($\mathbf{Z}_i$) i nultom ($\mathbf{Z}_o$). U prva dva slučaja potreban je trofazni simetrični napon, dok je za određivanje nulte impedancije potreban jednofazni napon.



Slika 2.8. Jednofazne ekvivalentne sheme sistema simetričnih komponenata

Mjesto da radimo s trofaznim shemama, pogodnije je upotrijebiti jednofazne ekvivalentne sheme (sl. 2.8). Za pojedine sheme možemo postaviti naponske jednadžbe

$$\mathbf{E}_d = \mathbf{V}_d + \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_d \qquad \ldots (2.19a)$$
$$\mathbf{E}_i = \mathbf{V}_i + \mathbf{I}_i\,\mathbf{Z}_i \qquad \ldots (2.19b)$$
$$\mathbf{E}_o = \mathbf{V}_o + \mathbf{I}_o\,\mathbf{Z}_o \qquad \ldots (2.19c)$$

Ako međutim pretpostavimo, što je najčešći slučaj, da na mrežu djeluje simetrični sistem elektromotornih sila, možemo postaviti $\mathbf{E}_i = 0$ i $\mathbf{E}_o = 0$, pa naponske jednadžbe glase

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_d \qquad \ldots (2.20a)$$
$$\mathbf{V}_i = -\mathbf{I}_i\,\mathbf{Z}_i \qquad \ldots (2.20b)$$
$$\mathbf{V}_o = -\mathbf{I}_o\,\mathbf{Z}_o \qquad \ldots (2.20c)$$

Pomoću jednofaznih ekvivalentnih shema mogu se — kako ćemo kasnije vidjeti — odrediti veličine struja i napona u nesimetrično opterećenim mrežama. No najprije je potrebno znati odrediti veličine impedancija u pojedinim jednofaznim ekvivalentnim shemama.

2.2. Zanemarenje djelatnih otpora

Određivanje struja kratkog spoja u visokonaponskim mrežama možemo provesti s dovoljnom tačnošću, ako mjesto s impedancijama računamo samo s reaktancijama. Tako određene struje kratkog spoja veće su od stvarnih struja. Razliku (apsolutnu pogrešku) možemo odrediti iz relacije

$$\Delta I = V\left(\frac{1}{X} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}}\right) \qquad \ldots (2.21)$$

dok se relativna pogreška Δi dobiva dijeljenjem apsolutne pogreške s tačnom vrijednošću, pa je

$$\Delta i = \sqrt{\left(\frac{R}{X}\right)^2 + 1} - 1 \qquad \ldots (2.22)$$

Ovisnost relativne pogreške o omjeru R/X prikazana je na sl. 2.9.

Smatra se da je prilikom određivanja strujâ kratkog spoja postignuta dovoljna tačnost i uz zanemarenje djelatnog otpora, ako je

$$\text{arc tg}\,\frac{X}{R} > 60^\circ \qquad \ldots (2.23)$$

odnosno, ako je

$$\frac{R}{X} < 0{,}577$$

što odgovara (sl. 2.9) pogrešci nešto većoj od 15%.

Spomenuti uvjet normalno je uvijek ispunjen u visokonaponskim mrežama.

Tako se za sinhrone generatore (Lit. 22) omjer R/X kreće u granicama

od 0,008 do 0,025

a za transformatore imamo srednje vrijednosti u ovisnosti o nazivnoj snazi

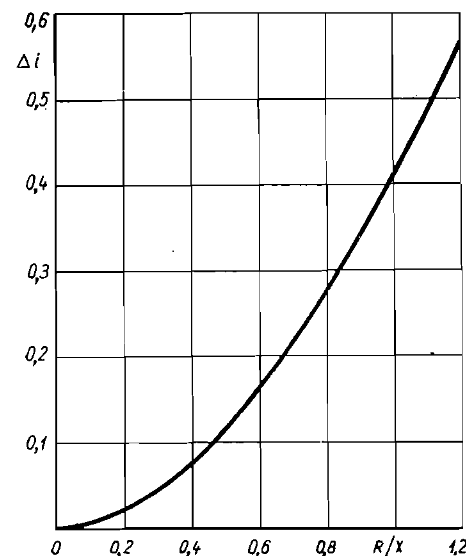
2,5	MVA	0,100
10	MVA	0,075
50	MVA	0,040
100	MVA	0,030
250	MVA	0,025

Za zračne vodove omjer R/X nalazi se u granicama

od 0,10 do 0,50

dok je za kabele

od 0,30 do 1,00



Slika 2.9. Ovisnost pogreške pri određivanju struje kratkog spoja uz zanemarenje djelatnog otpora o omjeru djelatnog otpora (*R*) i reaktancije (*X*)

2.3. REAKTANCIJE SINHRONIH GENERATORA

A. Održanje toka i vremenska konstanta

Pri svakoj brzoj promjeni stanja mora se računati s magnetskom tromošću, jer se magnetski tok ne može naglo promijeniti.

Po drugom Kirchhoffovom zakonu možemo, naime, postaviti za strujni **krug s djelatnim otporom i induktivitetom**

$$Ri + \frac{d\varphi}{dt} = e, \qquad \ldots (2.24)$$

gdje su i i e momentane vrijednosti struja i napona, R djelatni otpor, a φ momentana vrijednost toka obuhvaćenog svitkom u strujnom krugu.

Integriranjem od 0 do Δt dobivamo

$$R\int_0^{\Delta t} i\,dt + \Delta\varphi = \int_0^{\Delta t} e\,dt \qquad \ldots (2.25)$$

Za slučaj kad je $\Delta t \to 0$, oba integrala također teže k nuli, pa i $\Delta\varphi$ teži k nuli. U posebnom slučaju, kad je $R = 0$ i $e = 0$, što postižemo premoštenjem izvora napona, izraz (2.24) glasi

$$\frac{d\varphi}{dt} = 0 \qquad \ldots (2.26)$$

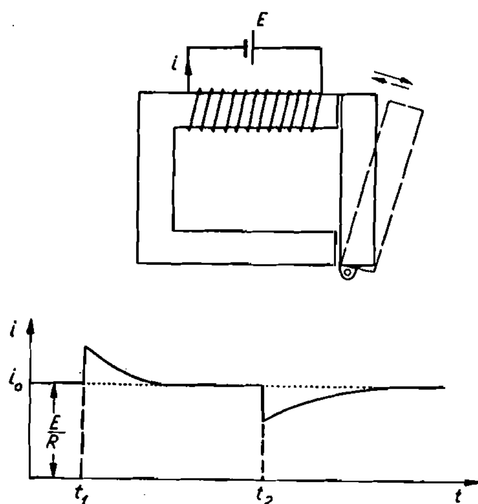
a odatle

$$\varphi = \text{konst.}$$

To znači da se tok obuhvaćen namotom s djelatnim otporom ne može brzo promijeniti ($\Delta\varphi \rightarrow 0$), dok bi tok obuhvaćen namotom bez djelatnog otpora stalno ostao nepromijenjen (φ = konst).

Pogledajmo na dva jednostavna primjera posljedice magnetske tromosti.

Zamislimo relej sa željeznom jezgrom i s namotom priključenim na akumulatorsku bateriju (sl. 2.10). Pretpostavimo da je pomična kotva prislonjena uz jezgru. Struja kroz namot određena je tada naponom baterije i djelatnim otporom namota ($i_o = E/R$). Pretpostavimo dalje da ćemo u



Slika 2.10. Promjena struje u namotu releja prouzrokovana trenutnim odmicanjem kotve u momentu (t_1) i trenutnim primicanjem kotve u momentu (t_2)

momentu t_1 naglo odmaknuti kotvu od jezgre. Taj pomak dovodi do povećanja zračnog raspora između jezgre i kotve, što povećava magnetski otpor u krugu. Budući da se magnetski tok ne može naglo promijeniti, kroz željezo i zračni raspor protjecat će neposredno nakon odmicanja kotve isti tok kao i prije odmicanja, a to će biti moguće samo onda ako kroz namot proteče veća struja (povećanje amperzavoja), koja će biti u stanju da održi isti tok i pored povećanja magnetskog otpora. Nakon naglog povećanja struje neposredno nakon odmicanja kotve struja će u namotu opadati, dok ne postigne vrijednost i_0 koju je imala prije odmicanja kotve. Za to vrijeme i magnetski tok opada, a energija magnetskog toka troši se u djelatnom otporu namota. Ako nakon što postignemo stacionarno stanje naglo primaknemo kotvu jezgri (moment t_2 na sl. 2.10), neće ni tada u prvom trenutku doći do promjene magnetskog toka, iako će se smanjiti magnetski otpor. Takve prilike tražit će smanjenje struje u namotu, koja će postepeno rasti, dok opet ne postigne vrijednost i_0, kad će i tok postići vrijednost koju je imao prije odmicanja kotve.

U drugom primjeru promotrimo prilike u transformatoru kojemu je primarni namot priključen na mrežu, a sekundarne stezaljke su otvorene. Što će se dogoditi u transformatoru, ako kratko spojimo sekundarne stezaljke? U normalnom pogonu, dakle i prije nastanka kratkog spoja, izmje-

nični tok, koji proizvodi struja magnetiziranja, obuhvaćen je sekundarnim namotom. Pretpostavimo da u momentu nastanka kratkog spoja taj tok nije jednak nuli. Ako dakle u momentu nastanka kratkog spoja sekundarni namot obuhvaća neki tok, taj tok mora ostati konstantan, uz pretpostavku da je djelatni otpor sekundarnog namota $R = 0$. Istodobno će izmjenični tok obuhvaćen primarnim namotom morati i dalje postojati, da bi u primarnom namotu inducirao protuelektromotornu silu, koja se suprotstavlja narinutom naponu iz mreže. Da bi se održao konstantan tok u sekundarnom namotu potrebna je istosmjerna struja u sekundarnom namotu. Trenutna pojava istosmjerne komponente sekundarne struje izmijenila bi tok obuhvaćen primarnim namotom, kad se ne bi istodobno pojavila istosmjerna komponenta primarne struje. Osim toga, proizvodnja izmjeničnog toka obuhvaćenog primarnim namotom traži izmjeničnu struju u primarnom namotu. Taj bi tok proizveo izmjenični tok kroz sekundarni namot, da se nije pojavila i izmjenična komponenta sekundarne struje. Prema tome i u primarnom i u sekundarnom namotu teku i istosmjerna i izmjenična komponenta struje kratkog spoja. Izmjenične komponente struje podržavaju se narinutim naponom i one će ostati i nakon nestanka istosmjerne komponente struje, koja opada kako se energija toka troši u djelatnom otporu namota. Veličina istosmjerne komponente struje ovisi o veličini toka obuhvaćenog sekundarnim namotom u momentu nastanka kratkog spoja.

Da karakteriziramo brzinu promjene neke veličine, obično uvodimo pojam vremenske konstante. U strujnom krugu, u kojem su u seriju spojeni otpor R i induktivitet L, kroz koje je u momentu nastanka kratkog spoja tekla struja i_o, promjena struje određena je rješenjem diferencijalne jednadžbe

$$Ri + L\,\frac{di}{dt} = 0 \qquad \ldots (2.27)$$

koje glasi

$$i = i_o\, e^{-tR/L} \qquad \ldots (2.28)$$

Izraz (2.28) možemo pisati u obliku

$$i = i_o\, e^{-t/T} \qquad \ldots (2.29)$$

gdje je

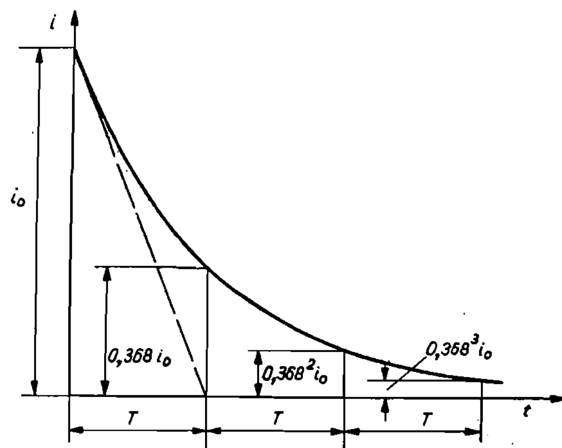
$$T = \frac{L}{R} \qquad \ldots (2.30)$$

vremenska konstanta strujnog kruga. Omjer induktiviteta (Ω s) i djelatnog otpora (Ω) ima dimenziju vremena (s). Što znači da neki strujni krug ima vremensku konstantu T sekunda? Ako postavimo da je $t = T$, za izraz (2.29) moći ćemo napisati

$$i = \frac{i_o}{e} = 0{,}368\ i_o$$

jer je $e = 2{,}7182\ldots$ Vremenska je konstanta, dakle, vrijeme nakon kojega će promjenljiva veličina opasti na 0,368 početne vrijednosti (sl. 2.11). Vre-

menska konstanta može se definirati i kao vrijeme za koje bi promjenljiva veličina postigla vrijednost nula, ako bi se promjena nastavila onom brzinom koju je imala u prvom momentu (crtkana linija na sl. 2.11). Tangens kuta nagiba tangente iznosi



Slika 2.11. Značenje vremenske konstante

$$\frac{di}{dt} = -\frac{i_0}{T} e^{-t/T} \qquad \ldots (2.31)$$

pa je za $t = 0$

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0} = -\frac{i_0}{T} \qquad \ldots (2.32)$$

Jednadžba tangente na krivulju u tački $t = 0$ glasi

$$i = i_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \qquad \ldots (2.33)$$

odakle se za $t = T$ dobiva $i = 0$.

Ako poznamo vremensku konstantu, možemo neposredno odrediti kad će biti dostignuta desetina, stotnina itd. početne vrijednosti (sl. 2.12). To određujemo izrazom

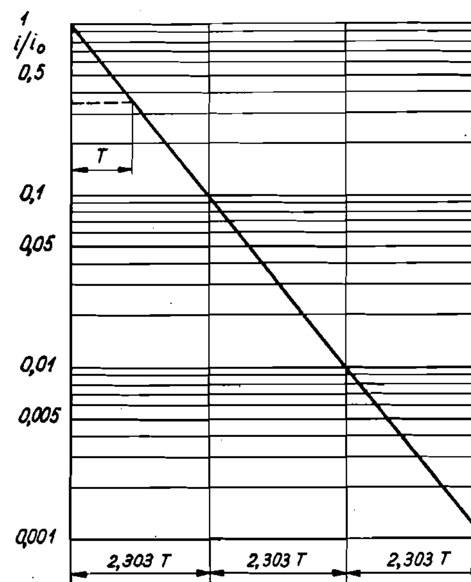
$$t = T \frac{\log \frac{i_0}{i}}{\log e} \qquad \ldots (2.34)$$

Postavimo li, naime $\frac{i_0}{i} = 10$, dobit ćemo $t = 2{,}303\ T$, za $\frac{i_0}{i} = 100$ dobivamo $t = 2 . 2{,}303\ T$ itd.

Vremensku konstantu možemo mjesto induktivitetom prikazati i magnetskim tokom, pa je

$$T = \frac{\Psi}{Ri} \qquad \ldots (2.35)$$

jer je $\Psi = w\,\Phi = Li$, gdje je w broj zavoja.



Slika 2.12. Krivulja opadanja struje (2.28) u polulogaritamskom dijagramu

U izrazu (2.35) imamo i tumačenje radi čega bi tok ostao stalno nepromijenjen, ako pretpostavimo da je $R = 0$. Vremenska konstanta je tada neizmjerno velika, pa će i promjenljiva veličina — u našem slučaju tok, a za slučaj prikazan u (2.28) struja — ostati stalno jednaka početnoj vrijednosti ($i = i_0$).

Naravno da provedena promatranja vrijede i za slučaj kad razmatrana veličina postiže neku konačnu vrijednost različitu od nule. Ako tu konačnu vrijednost označimo sa i_s, a početnu vrijednost sa i_o, promjenu ćemo moći prikazati izrazom

$$i = i_s + (i_0 - i_s)\, e^{-t/T} \qquad \ldots (2.36)$$

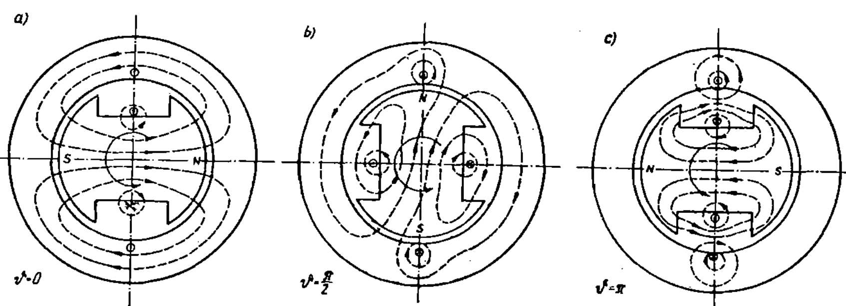
gdje prvi član predstavlja stacionarnu struju, a drugi član prolaznu struju, koja je za $t = 0$ razlika između početne i konačne vrijednosti struje.

B. Prilike u generatoru za vrijeme trajanja kratkog spoja

Pretpostavimo da uzbuđeni sinhroni generator rotira u praznom hodu, dakle s otvorenim stezaljkama. Magnetski tok koji proizvode amperzavoji rotora (uzbuđeni namot) obuhvaćen je uzbudnim namotom, a dio toga toka

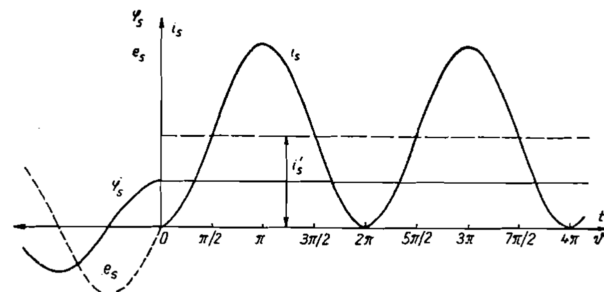
obuhvaćen je i namotom statora. Veličina toka obuhvaćenog statorskim namotom ovisi o međusobnom položaju rotora i statora. Budući da se pri naglој promjeni prilika ne može naglo promijeniti tok, prilike u generatoru za vrijeme trajanja kratkog spoja ovisit će o toku obuhvaćenom namotom statora u trenutku nastanka kratkog spoja.

Razmotrimo najprije prilike u generatoru, ako kratki spoj na stezaljkama nastane u trenutku kad je tok obuhvaćen statorskim namotom maksimalan. Položaj rotora prema statorskom namotu u trenutku kratkog spoja prikazan je na sl. 2.13a. Radi bolje preglednosti namot rotora i statora prikazan je sa po jednim zavojem.



Slika 2.13. Magnetski tokovi u sinhronom generatoru za vrijeme kratkog spoja ako kratki spoj nastane u momentu kad je tok obuhvaćen namotom statora maksimalan; (a) u momentu nastanka kratkog spoja, (b) četvrt periode nakon nastanka kratkog spoja, (c) pola periode nakon nastanka kratkog spoja

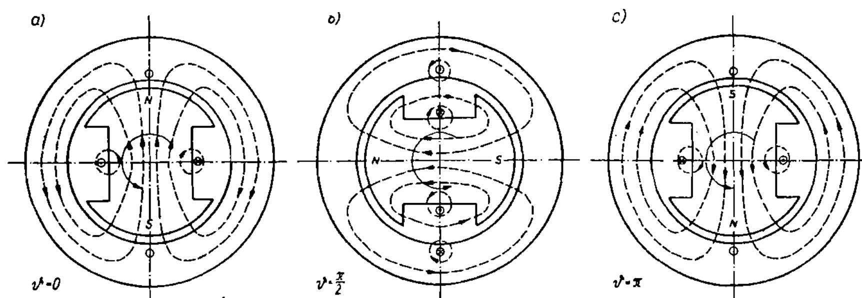
U trenutku nastanka kratkog spoja u namotu statora nema struje, jer smo pretpostavili da je generator bio u praznom hodu, a i napon na stezaljkama jednak je nuli, jer je tok koji obuhvaća statorski namot maksimalan. Kad ne bi bilo kratkog spoja na stezaljkama generatora, tok obuhvaćen statorskim namotom mijenjao bi se radi okretanja rotora prema izrazu $\varphi_s = \Phi_{sm} \cos \vartheta$, gdje je Φ_{sm} maksimalni tok, a ϑ kut zakretanja rotora (stvarni kut za generator s jednim parom polova, a električki kut za generator s više pari polova). Zbog nastanka kratkog spoja na stezaljkama, međutim, ni tok obuhvaćen namotom statora ni tok obuhvaćen namotom rotora, ne može se promijeniti, ako pretpostavimo da je djelatni otpor namota jednak nuli. Rotor se okreće i sve je manji dio toka proizvedenog od uzbudnog namota obuhvaćen statorskim namotom, pa se radi održanja toka pojavljuje struja u statorskom namotu koja treba da bude tolika da održi ukupni tok na konstantnoj veličini. Četvrtinu periode $\left(\vartheta = \frac{\pi}{2}\right)$ nakon nastanka kratkog spoja (sl. 2.13b) tok proizveden uzbudnim namotom neće biti obuhvaćen statorskim namotom, pa će kroz stator morati protjecati tolika struja da protjera onoliki tok, koliki je postojao u trenutku nastanka kratkog spoja. Daljnjim okretanjem rotora tok proizveden od uzbudnog namota, a obuhvaćen od statorskog namota, postaje sve veći, ali ima suprotan smjer od onog koji je imao u trenutku nastanka kratkog spoja, pa struja u statorskom namotu i dalje mora rasti. Sada naime ne samo da mora proizvesti tok koji je postojao u trenutku nastanka kratkog spoja, nego i protuamperzavoje koji će se suprotstaviti magnetskom toku proizvedenom od uzbudnog namota. Struja postiže maksimalnu vrijednost polovinu periode ($\vartheta = \pi$) nakon nastanka kratkog spoja, jer se daljnjim zakretanjem rotora ponovno smanjuje tok proizveden od uzbudnog namota, a obuhvaćen namotom statora. Održanje toka obuhvaćenog statorskim namotom tražit će u ovom slučaju pulzirajuću struju u statoru (sl. 2.14), koju možemo rastaviti u dvije komponente: istosmjernu (i_s') i izmjeničnu, koja se superponira na istosmjernu komponentu.



Slika 2.14. Struja u statorskom namotu (i_s) sinhronog generatora za vrijeme kratkog spoja, ako kratki spoj nastane u momentu ($\vartheta = 0$) kad tok obuhvaćen statorskim namotom (φ_s) maksimalan (e_s napon na stezaljkama prije kratkog spoja)

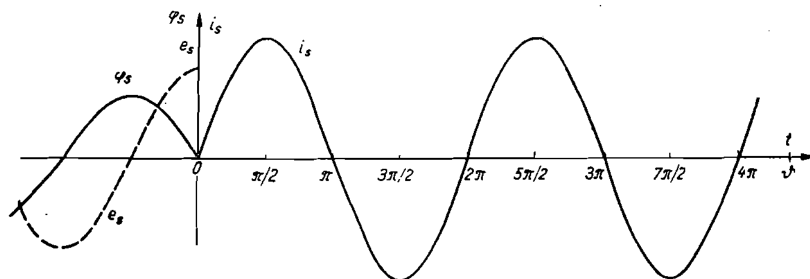
Promotrimo sada prilike u generatoru, kada do kratkog spoja dođe u momentu ($\vartheta = 0$) kad tok obuhvaćen statorskim namotom bude jednak nuli ($\varphi_s = 0$). Prilike u neopterećenom generatoru u tom trenutku prikazane su na sl. 2.15a. Budući da u trenutku kratkog spoja ne postoji tok obuhvaćen statorskim namotom, uz pretpostavku da je $R = 0$, ne smije se ni nakon nastanka kratkog spoja pojaviti tok. Zakretanjem rotora iz položaja koji smo označili sa $\vartheta = 0$, povećat će se tok proizveden namotom rotora, a obuhvaćen namotom statora, pa će radi toga da bi se održao $\varphi_s = 0$, poteći kroz kratkospojeni namot statora struja koja će proizvoditi amperzavoje koji će se suprotstavljati amperzavojima proizvedenim od struje u rotoru. Maksimalni tok proizveden namotom rotora, a obuhvaćen namotom statora, bit će za $\vartheta = \frac{\pi}{2}$ odnosno za položaj rotora prikazan na sl. 2.15b, pa će u tom trenutku i struja u statorskom namotu morati biti maksimalna (sl. 2.16). Daljnjim zakretanjem rotora, a u trenutku kad je $\vartheta = \pi$, doći će rotor u položaj prikazan na sl. 2.15c, kada će biti $\varphi_s = 0$, pa će i struja u statoru biti $i_s = 0$. Daljnjim pomakom rotora tok proizveden namotom rotora, a obuhvaćen namotom statora, rast će, ali u izmijenjenom smjeru, pa će i struja u statorskom namotu, da bi proizvela tok koji se suprotstavlja toku rotora, promijeniti smjer. Radi toga je struja kratkog spoja u statoru izmjenična struja jednake frekvencije, kao i frekvencija struje opterećenja.

Slučajevi prikazani na sl. 2.13.—2.16. granični su slučajevi pa su, naravno, mogući i svi međuslučajevi, odnosno kratki spoj može nastati pri bilo kojem položaju rotora.



Slika 2.15. Magnetski tokovi u sinhronom generatoru za vrijeme kratkog spoja, ako kratki spoj nastane u momentu kad je tok obuhvaćen namotom statora jednak nuli.
a) u momentu nastanka kratkog spoja
b) četvrt periode nakon nastanka kratkog spoja
c) pola periode nakon nastanka kratkog spoja

U dosadašnjim razmatranjima promatrali smo samo namot jedne faze statora, ali sličnim rezoniranjem dolazimo i do prilika u sinhronom generatoru, ako uzmemo u obzir namote svih triju faza koje su raspoređene po statoru. Tok proizveden namotom rotora miruje u odnosu na rotor, a rotira sinhronom brzinom u odnosu na stator. Ako pretpostavimo da je raspodjela magnetskog polja u zračnom rasporu sinusna, tok proizveden namotom rotora možemo rastaviti u tri toka nepomična prema statoru, ali vremenski promjenljiva po zakonu sinusa. Ta tri toka među-



Slika 2.16. Struja u statorskom namotu (i_s) sinhronog generatora za vrijeme kratkog spoja, ako kratki spoj nastane u momentu ($\vartheta = 0$) kad je tok obuhvaćen statorskim namotom (φ_s) jednak nuli ($\varphi_s = 0$). (e_s napon na stezaljkama generatora prije kratkog spoja)

sobno su pomaknuta za 120°, a njihove trenutne vrijednosti ovise o položaju rotora, pa ih možemo prikazati relacijama

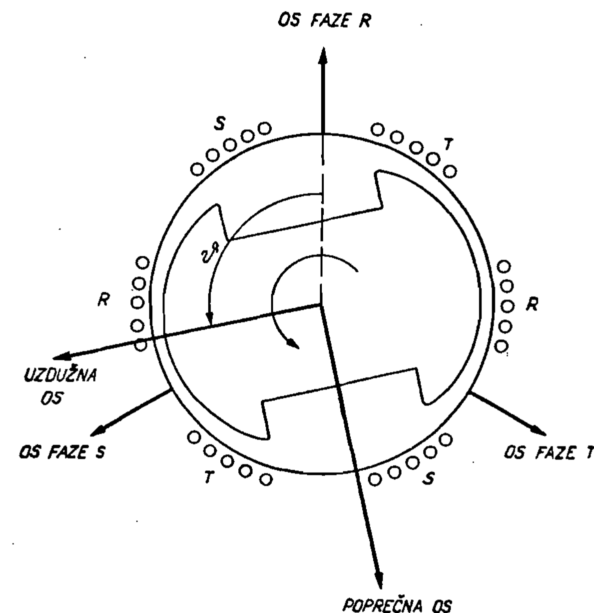
$$\varphi_{Rs} = \Phi_{sm} \cos \vartheta \qquad \ldots (2.37a)$$

$$\varphi_{Ss} = \Phi_{sm} \cos (\vartheta - 120°) \qquad \ldots (2.37b)$$

$$\varphi_{Ts} = \Phi_{sm} \cos (\vartheta - 240°) \qquad \ldots (2.37c)$$

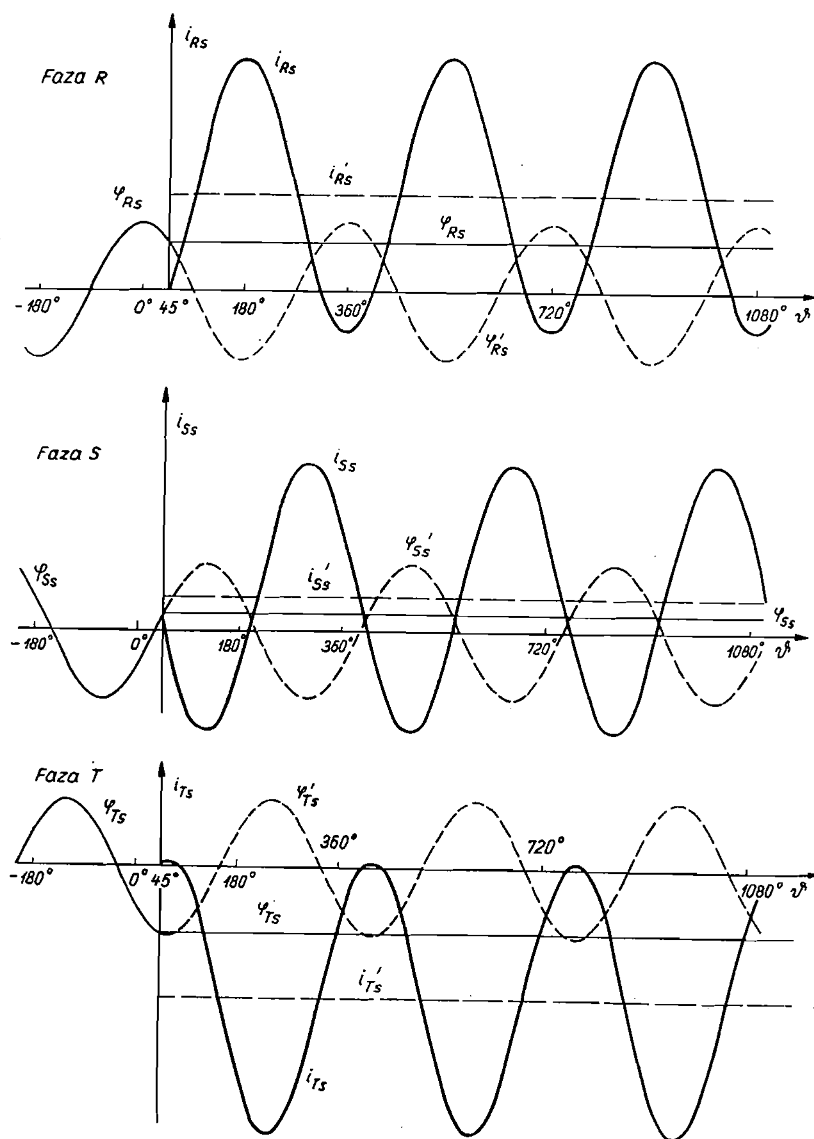
gdje je Φ_{sm} maksimalna vrijednost toka, a ϑ kut između uzdužne osi polova rotora i osi namota faza R (sl. 2.17). Kut ϑ je funkcija vremena, jer je $\vartheta = \omega t$.

Ako npr. nastane kratak spoj u momentu $\vartheta = 60°$, tokovi obuhvaćeni pojedinim fazama namota statora iznosit će: $\varphi_{Rs} = 0{,}5\ \Phi_{sm}$, $\varphi_{Ss} = 0{,}5\ \Phi_{sm}$ i $\varphi_{Ts} = -1{,}0\ \Phi_{sm}$. Radi magnetske tromosti, a uz pretpostavku da je djelatni otpor $R = 0$, takvi tokovi trajno će obuhvatati namote pojedinih faza, pa će se — da bi se takvi tokovi održali — pojaviti u pojedinim fazama istosmjerna komponenta struje (i_s' na sl. 2.14). Naravno da će smjer i veličina struje ovisiti o smjeru i veličini toka koji treba odr-



Slika 2.17. Definicije uzdužne i poprečne osi, te osi namota statora u sinhronom generatoru

žavati, pa se može pojaviti i slučaj da u jednoj od faza ne bude istosmjerne komponente struje kratkog spoja (u fazi R kad je $\vartheta = 90°$ i $\vartheta = 270°$, u fazi S za $\vartheta = 30°$ i 210°, a u fazi T za $\vartheta = 150°$ i 330°). Tok proizveden od rotora, koji dakle rotira sinhronom brzinom, djelovat će na statorski namot, pa će taj tok — ovisno o položaju rotora — nastojati ili oslabiti ili pojačati tok obuhvaćen namotom statora. To nastojanje, radi održanja konstantnosti toka, dovest će do pojave izmjenične komponente struje kratkog spoja u namotima statora. Vrijednost izmjenične komponente struje u pojedinim fazama ovisit će o međusobnom položaju rotora i namota tih faza, pa će fazni pomak među strujama u pojedinim fazama iznositi 120°. Na sl. 2.18. prikazane su struje u faznim namotima za slučaj nastanka kratkog spoja u trenutku kad je $\vartheta = 45°$. U svim slučajevima nacrtani su tokovi koji moraju ostati konstantni (φ_{Rs}, φ_{Ss} i φ_{Ts} prikazani punom linijom), kao i tokovi proizvedeni od rotorskog namota, koji bi bili obuhvaćeni od statorskih namota poje-



Slika 2.18. Struje kratkog spoja u statorskim namotima za slučaj nastanka kratkog spoja kad je $\vartheta = 45^0$

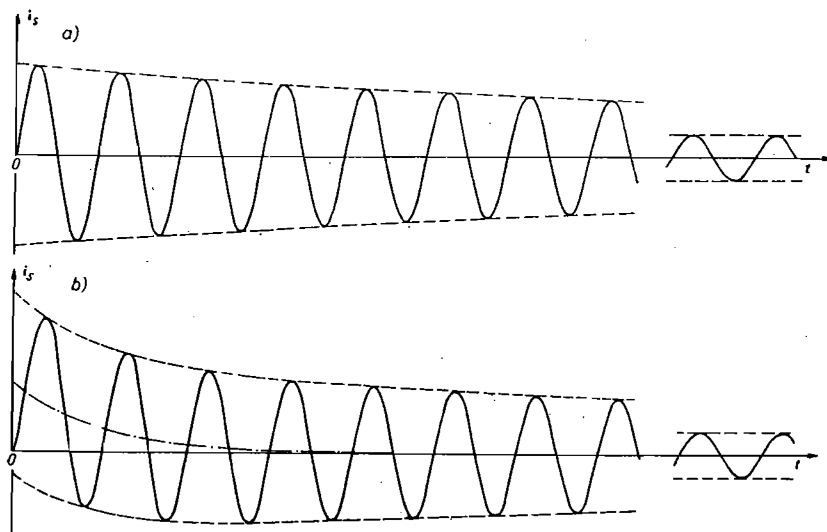
dinih faza kad ne bi postojao kratki spoj (φ_{Rs}', φ_{Ss}' i φ_{Ts}' prikazani crtkanom linijom nakon nastanka kratkog spoja). U svim slučajevima izmjenična se komponenta struje superponira na istosmjernu komponentu; amplitude izmjeničnih komponenata struja u svim fazama međusobno su jednake, dok je vrijednost istosmjerne komponente struje kratkog spoja ovisna o toku u trenutku nastanka kratkog spoja (ovisna dakle o trenutku nastanka kratkog spoja), a suma istosmjernih komponenata struja jednaka je nuli.

Tok obuhvaćen rotorskim namotima konstantan je i takav će ostati i nakon nastanka kratkog spoja, čemu se suprotstavljaju tokovi statora. Istosmjerna komponenta struje kratkog spoja u statorskim namotima proizvodi tok koji u odnosu na stator miruje i čija je indukcija sinusno raspodijeljena u zračnom rasporu, isto onako kako je to bilo u trenutku kratkog spoja. Tome toku, koji u odnosu na stator miruje, bit će u rotoru potrebna izmjenična struja, da bi se održao konstantan tok obuhvaćen rotorskim namotom. S druge pak strane, izmjenične komponente strujâ kratkog spoja u trima fazama proizvest će tri izmjenična toka, koji se mogu zamijeniti jednim sinusno raspoređenim tokom, ali koji rotira sinhronom brzinom. U odnosu na rotor, rezultantni tok proizveden od izmjeničnih komponenata struja kratkog spoja konstantan je tok, koji će — opet da se održi tok obuhvaćen namotima rotora — trebati u rotorskom namotu istosmjernu struju. Struja u rotoru bit će dakle sastavljena od istosmjerne i izmjenične komponente struje. Pojava jedne i druge komponente struje neće međutim ovisiti o trenutku nastanka kratkog spoja. Bez obzira na trenutak nastanka kratkog spoja pojavit će se naime isti tokovi (gledajući stator kao cjelinu) proizvedeni kako od istosmjerne, tako i od izmjenične komponente struje kratkog spoja u statorskim namotima, a cjelokupni tokovi statora (a ne tokovi pojedinih faza) mjerodavni su za pojavu struja u rotorskom namotu.

Sva dosada provedena razmatranja osnivaju se na pretpostavci da su djelatni otpori jednaki nuli. Ako međutim uzmemo u obzir djelatne otpore, neće se moći održati konstantan tok koji je zatečen u trenutku kratkog spoja, jer će se njegova energija trošiti za pokrivanje gubitaka u namotima i željezu. Radi toga će tok zatečen u trenutku nastanka kratkog spoja postepeno opadati, dok potpuno ne nestane. Gubici dovode do smanjenja toka proizvedenog od namota statora, pa tok proizveden rotorskim namotom sve više prodire u namot statora, dok se konačno ne uspostavi stanje kao da imamo generator opterećen reaktancijom konstantne veličine, jer je djelatni otpor namota generatora vrlo malen u odnosu na njegovu reaktanciju. Prema tome i istosmjerna i izmjenična komponenta struje kratkog spoja u statoru opadaju, s tom razlikom, da istosmjerna komponenta potpuno nestane, dok će se izmjenična komponenta konačno stabilizirati i ostati sve dok traje kratak spoj. Uzevši u obzir utjecaje na rotor, o čemu je već bilo govora, možemo tvrditi da izmjenična komponenta struje u namotu rotora opada kao istosmjerna komponenta struje u statoru, a istosmjerna komponenta struje u rotoru kao izmjenična komponenta struje u statorskom namotu.

Na sl. 2.19. prikazana je promjena struje kratkog spoja u statorskom namotu za slučaj kad nema istosmjerne komponente, i za slučaj kad se ta komponenta pojavljuje.

Dosada je pretpostavljano da u generatoru ne postoje drugi mogući strujni krugovi osim onih koje čine uzbudni namot na rotoru i statorski namoti. U rotoru generatora međutim postoji i prigušni namot. On je ili posebno izveden u obliku metalnih klinova koji zatvaraju utore na rotoru (turbogeneratori) ili štapova ugrađenih paralelno s osovinom u polna stopala i međusobno kratko spojenih (generator s izrazitim polovima). Prigušnim namotom mogu se smatrati i dijelovi rotora načinjeni od masivnog željeza. Ako generator nema posebno izvedenog prigušnog namota, te ako je rotor izveden od limova, može se smatrati da nema nikakvih prigušnih namota na rotoru, pa prema tomu ni njihova djelovanja. To vrijedi samo kao prva aproksimacija, jer će uvijek biti dijelova kroz koje će se moći zatvoriti struja.

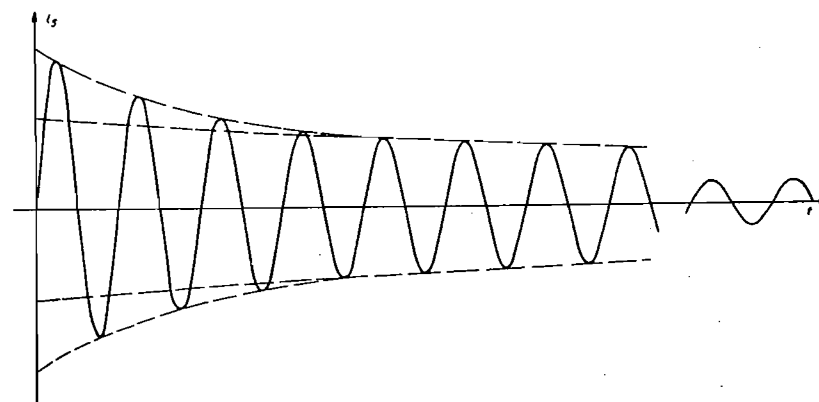


Slika 2.19. Primjer promjene struje kratkog spoja: (a) kad nema istosmjerne komponente i (b) kad se pojavljuje istosmjerna komponenta struje kratkog spoja

Prigušni namot je u stvari kratkospojeni namot kroz koji u normalnom pogonu ne teče struja. Radi njegovog rasporeda na rotoru i radi masivnih dijelova, povoljnije je utjecaj prigušnog namota promatrati kao utjecaj dvaju odvojenih namota: namota čija os pada zajedno s osi uzbudnog namota (uzdužni prigušni namot), i namota čija je os okomita na os uzbudnog namota (poprečni prigušni namot). U uzdužnom prigušnom namotu pojavit će se struje kao i u uzbudnom namotu rotora, jer uzdužni namot obuhvaća veći ili manji dio toka proizvedenog uzbudnim namotom. Na poprečni prigušni namot, koji nije obuhvaćen tokom uzbudnog namota, djelovat će tok koji u namotima statora treba istosmjernu struju, pa će se — prema ranije izloženom — u poprečnom prigušnom namotu pojaviti izmjenična struja, da bi se kroz taj namot održao tok nula, kakav je bio prije nastanka kratkog spoja. Sve će to uzrokovati još nepovoljniji raspored toka izazvanog statorskim namotom,

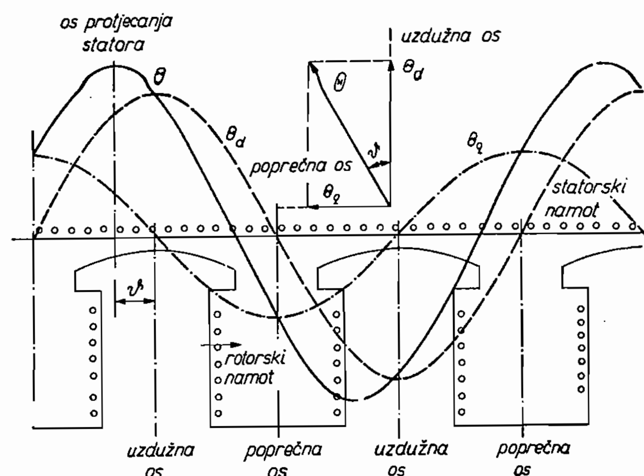
pa će kroz statorski namot morati da protječe još veća struja od one koja bi se pojavila kad ne bi postojali prigušni namoti. Vremenska konstanta prigušnog namota je malena, jer on ima relativno velik djelatni otpor, pa i utjecaj prigušnog namota na struju u statoru traje kratko.

Na sl. 2.20. prikazana je promjena struje u jednoj fazi za vrijeme kratkog spoja generatora s prigušnim namotom, za slučaj da nema istosmjerne komponente. Pojava istosmjerne komponente dovest će do pomaka za tu komponentu analogno sl. 2.19.

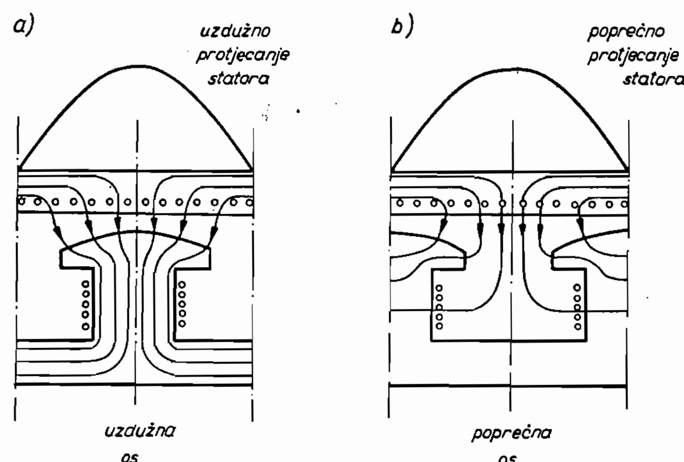


Slika 2.20. Primjer promjene struje kratkog spoja generatora s prigušnim namotom za slučaj kad nema istosmjerne komponente struje kratkog spoja

Prilikom razmatranja pojava u sinhronom generatoru moramo razlikovati turbogeneratore i generatore s izrazitim polovima. U prvima je zračni raspor između rotora i statora na svim mjestima praktički jednak, pa je magnetski otpor neovisan o položaju rotora. Nasuprot tomu, u generatoru s izrazitim polovima zračni raspor znatno je manji pod polnim stopalima, a znatno veći u dijelu između polova, pa je radi toga i magnetski otpor između statora i rotora veći u dijelu između polova. Da bi se ta razlika magnetskog otpora, ovisna o položaju rotora, uzela u obzir, povoljno je protjecanje statora podijeliti u dva dijela: uzdužno protjecanje, čija os pada zajedno s uzdužnom osi rotora, i poprečno protjecanje, čija se os poklapa s poprečnom osi rotora (sl. 2.17). Ta podjela je moguća, jer u trofaznom generatoru struje triju faza proizvode okretno polje, odnosno okretno protjecanje, koje rotira sinhronim brojem okretaja, dakle miruje u odnosu na rotor. Budući da je osnovni val protjecanja sinusno razdijeljen po obodu statora, taj val se može podijeliti u dva također sinusna vala koji — kao i osnovni val — rotiraju sinhronim brojem okretaja (sl. 2.21). Sada imamo uzdužno protjecanje, što proizvodi magnetski tok koji se može zatvoriti preko relativno uskog zračnog raspora (sl. 2.22a) i poprečno protjecanje, što proizvodi magnetski tok koji se mora zatvoriti znatnim dijelom preko zraka između polova (sl. 2.22b). Takva podjela omogućuje odvojeno razmatranje, pa se na taj način mogu uzeti u obzir različiti magnetski otpori u generatoru s izrazitim polovima.



Slika 2.21. Podjela protjecanja statora (Θ) na uzdužno (Θ_d) i poprečno (Θ_q) protjecanje statora.



Slika 2.22. Protjecanja statora i tokovi u generatoru s izrazitim polovima

C. Reaktancije sinhronog generatora

Analitički prikaz prilika izveden je za generator s izrazitim polovima, s kojega se neposredno može prijeći na prilike u turbogeneratoru.

Analitički prikaz osniva se na slijedećim pretpostavkama: 1) statorski namot proizvodi sinusno protjecanje, 2) promjenom položaja rotora ne mijenjaju se induktiviteti rotora radi utjecaja utora na statoru, 3) utjecaj zasićenja željeza je zanemaren, 4) međusobni induktiviteti između statora i rotora periodičke su funkcije radi promjene položaja rotora, 5) međusobni induktiviteti između dvaju namota statora također su periodične funkcije radi promjene zračnog raspora između rotora i statora (generator s izrazitim polovima!), 6) osi prigušnih namota na rotoru poklapaju se s uzdužnom, odnosno poprečnom osi rotora, a namoti su simetrični s obzirom na te osi.

Računa se, dakle, da postoji šest namota: tri fazna namota na statoru, uzbudni namot na rotoru (os uzbudnog namota poklapa se s uzdužnom osi rotora), uzdužni prigušni namot i poprečni prigušni namot. Veličine koje vrijede za pojedine namote označivat ćemo slijedećim indeksima: R, S i T za namote na statoru, m za uzbudni namot, pd za uzdužni namot, a pq za poprečni prigušni namot. Ako, osim toga, sa φ označimo momentane vrijednosti tokova, sa i momentane vrijednosti struja, sa L induktivitete, a sa M međuinduktivitete, moći ćemo za tokove obuhvaćene namotima na statoru postaviti

$$\varphi_R = -L_R\, i_R - M_{RS}\, i_S - M_{RT}\, i_T + M_{Rm}\, i_m + M_{Rpd}\, i_{pd} + M_{Rpq}\, i_{pq} \qquad \ldots (2.38a)$$

$$\varphi_S = -M_{SR}\, i_R - L_S\, i_S - M_{ST}\, i_T + M_{Sm}\, i_m + M_{Spd}\, i_{pd} + M_{Spq}\, i_{pq} \qquad \ldots (2.38b)$$

$$\varphi_T = -M_{TR}\, i_R - M_{TS}\, i_S - L_T\, i_T + M_{Tm}\, i_m + M_{Tpd}\, i_{pd} + M_{Tpq}\, i_{pq} \qquad \ldots (2.38c)$$

Svaki član npr. izraza za φ_R predstavlja tok proizveden od struje odgovarajućeg namota, a obuhvaćen namotom faze R. Indeksi R i S, uz M u drugom članu izraza (2.38a), znače da se radi o međuinduktivitetu između namota R i S. Treba imati u vidu da su npr. međuinduktiviteti M_{RS} i M_{SR} međusobno jednaki, što vrijedi analogno za sve međuinduktivitete. Struje statora označene su negativnim, a struje rotora pozitivnim predznakom.

Analogno za tokove obuhvaćene namotima rotora dobivamo

$$\varphi_m = -M_{mR}\, i_R - M_{mS}\, i_S - M_{mT}\, i_T + L_m\, i_m + M_{mpd}\, i_{pd} \qquad \ldots (2.39a)$$

$$\varphi_{pd} = -M_{pdR}\, i_R - M_{pdS}\, i_S - M_{pdT}\, i_T + M_{pdm}\, i_m + L_{pd}\, i_{pd} \qquad \ldots (2.39b)$$

$$\varphi_{pq} = -M_{pqR}\, i_R - M_{pqS}\, i_S - M_{pqT}\, i_T + L_{pq}\, i_{pq} \qquad \ldots (2.39c)$$

U izrazima (2.39) nije naveden međusobni utjecaj uzbudnog i poprečnog prigušnog namota, ni međusobni utjecaj uzdužnog i poprečnog prigušnog namota. Međusobni utjecaji tih namota ne postoje, budući da su njihove osi međusobno okomite, pa je $M_{mpq} = M_{pqm} = M_{pdpq} = M_{pqpd} = 0$.

Potrebno je da sada odredimo izraze za induktivitete i međuinduktivitete.

Induktivitet faznog namota mijenja se s položajem rotora; najveći je kad se uzdužna os rotora poklopi s osi namota, a najmanji kad poprečna os padne zajedno s osi namota. Period promjene jest 180°, a maksimum za fazu R pojavljuje se pri $\vartheta = 0°$ i $\vartheta = 180°$. Takav zahtjev zadovoljava izraz

$$L_R = L_{Ro} + L_R' \cos 2\vartheta \qquad \ldots (2.40a)$$

Takva promjena induktiviteta (Lit. 4) dobro odgovara stvarnim promjenama (sl. 2.23).

Gore navedeni izraz potječe iz slijedećih razmatranja. Induktivitet faze R proporcionalan je toku koji proizvodi struja toga namota, dok su ostali namoti bez struje. Taj tok možemo podijeliti u dva dijela: dio φ_{1R}, koji se zatvara u samom statoru, i dio φ_{2R}, koji prelazi u rotor, pa je radi toga ovisan o položaju rotora prema namotu faze R. Dio toka φ_{1R} možemo prikazati relacijom

$$\varphi_{1R} = L_{1R}\, i_R \qquad \ldots (2.41)$$

Drugi dio toka, da bi se uzelo u obzir kretanje rotora, treba rastaviti u uzdužnu i poprečnu komponentu toka. Budući da je protjecanje sinusno raspoređeno na obodu statora, možemo računati da u smjeru uzdužne osi djeluje protjecanje $\Theta_R \cos\vartheta$, koje proizvodi tok φ_{Rd}, a da u smjeru poprečne osi djeluje protjecanje $-\Theta_R \sin\vartheta$, koje proizvodi tok φ_{Rq}. Kad bi se uzdužna os poklapala s osi namota, toku φ_{Rd} odgovarao bi induktivitet L_{Rd}. Budući da ta poklapanja trajno ne postoje, odnosno javljaju se samo u pojedinim momentima, za te tokove možemo postaviti

$$\varphi_{Rd} = L_{Rd}\, i_R \cos\vartheta \qquad \ldots (2.42a)$$

$$\varphi_{Rq} = -L_{Rq}\, i_R \sin\vartheta \qquad \ldots (2.42b)$$

To su tokovi u uzdužnoj i poprečnoj osi, a da se dobije tok faze R treba te tokove projicirati u os R, pa za tok koji prelazi u rotor imamo

$$\varphi_{2R} = \varphi_{Rd} \cos\vartheta - \varphi_{Rq} \sin\vartheta \qquad \ldots (2.43)$$

a odatle

$$\varphi_{2R} = L_{Rd}\, i_R \cos^2\vartheta + L_{Rq}\, i_R \sin^2\vartheta \qquad \ldots (2.44)$$

Ukupan tok koji obuhvaća fazu R, a proizveden je strujom iste faze, dobiva se kao zbroj tokova φ_{1R} (2.41) i φ_{2R} (2.44), pa je

$$\varphi_R = L_R\, i_R = (L_{1R} + L_{Rd} \cos^2\vartheta + L_{Rq} \sin^2\vartheta)\, i_R \qquad \ldots (2.45)$$

Iz (2.45) se vidi da je induktivitet faze R jednak izrazu u zagradi, pa pojednostavnjanjem dobivamo

$$L_R = L_{1R} + \frac{1}{2}(L_{Rd} + L_{Rq}) + + \frac{1}{2}(L_{Rd} - L_{Rq}) \cos 2\vartheta \qquad \ldots (2.46)$$

Kad usporedimo taj izraz sa (2.40a), dobivamo da je

$$L_{Ro} = L_{1R} + \frac{1}{2}(L_{Rd} + L_{Rq}) \qquad \ldots (2.47a)$$

$$L_R' = \frac{1}{2}(L_{Rd} - L_{Rq}) \qquad \ldots (2.47b)$$

Za fazu S imamo slično, ali s tom razlikom da se maksimum postiže za $\vartheta = 120°$ i 300°, jer je os faze S prema osi faze R zakrenuta za 120°. Izraz za induktivitet faze S dakle glasi

$$L_S = L_{So} + L_S' \cos 2(\vartheta - 120°) \qquad \ldots (2.40b)$$

Analogno tome, za fazu T imamo (faza T zakrenuta je prema fazi R za 240° ili za −120°)

$$L_T = L_{To} + L_T' \cos 2(\vartheta + 120°) \qquad \ldots (2.40c)$$

Budući da su svi namoti na statoru izvedeni jednako, mora biti

$$L_{Ro} = L_{So} = L_{To} = L_o \qquad \ldots (2.48)$$

kao i

$$L_R' = L_S' = L_T' = L_1 \qquad \ldots (2.49)$$

pa su izrazi za induktivitete faza

$$L_R = L_o + L_1 \cos 2\vartheta \qquad \ldots (2.50a)$$

$$L_S = L_o + L_1 \cos 2(\vartheta - 120°) \qquad \ldots (2.50b)$$

$$L_T = L_o + L_1 \cos 2(\vartheta + 120°) \qquad \ldots (2.50c)$$

Međusobni induktivitet namota dviju faza također se mijenja s položajem rotora, pa njegovu vrijednost možemo odrediti sličnim postupkom kao i induktivitet faznog namota. I sada možemo tok koji proizvodi struja i_R, a obuhvaća ga namot faze S, podijeliti u dva dijela: dio φ_{1SR}, koji se zatvara u statoru, i dio φ_{2SR}, koji prelazi u rotor. Dio toka u statoru iznosi

$$\varphi_{1SR} = M_{1SR}\, i_R \qquad \ldots (2.51)$$

dok tokove koji prelaze u rotor možemo — kao i prije — rastaviti u uzdužnu φ_{Rd} (2.42a) i poprečnu φ_{Rq} (2.42b) komponentu. To su tokovi proizvedeni strujom i_R, a da se dobije tok obuhvaćen namotom faze S, treba te tokove projicirati na os faze S. Prema tome tok proizveden strujom u fazi R koji prelazi u rotor, a obuhvaćen je namotom faze S, iznosi

$$\varphi_{2SR} = \varphi_{Rd} \cos(\vartheta - 120°) - \varphi_{Rq} \sin(\vartheta - 120°) \qquad \ldots (2.52)$$

jer je os faze S za 120° zakrenuta prema osi faze R, pa je — uzevši u obzir relacije (2.42a) i (2.42b) —

$$\varphi_{2SR} = L_{Rd}\, i_R \cos\vartheta \cos(\vartheta - 120°) + + L_{Rq}\, i_R \sin\vartheta \sin(\vartheta - 120°) \qquad \ldots (2.53)$$

Ukupan tok proizveden strujom i_R, a obuhvaćen namotom faze S, iznosi dakle

$$\varphi_{SR} = M_{RS}\, i_R = [M_{1SR} + L_{Rd} \cos\vartheta \cos(\vartheta - 120^\circ) + $$
$$+ L_{Rq} \sin\vartheta \sin(\vartheta - 120^\circ)]\, i_R \qquad \ldots (2.54)$$

Iz (2.54) dolazimo do izraza za međuinduktivitet

$$M_{SR} = M_{1SR} - \frac{L_{Rd} + L_{Rq}}{4} +$$
$$+ \frac{L_{Rd} - L_{Rq}}{2} \cos(2\vartheta - 120^\circ), \qquad \ldots (2.55)$$

koji analogno izrazu (2.40) možemo pisati

$$M_{SR} = -M_{SR_0} + L_R' \cos(2\vartheta - 120^\circ) \qquad \ldots (2.56a)$$

u kojemu je

$$M_{SR_0} = -M_{1SR} + \frac{L_{Rd} + L_{Rq}}{4} \qquad \ldots (2.56b)$$

dok je $L_R' = \frac{1}{2}(L_{Rd} - L_{Rq})$, kao i u izrazu (2.47b).

Radi simetričnosti izvedbe i radi jednakog međusobnog djelovanja možemo postaviti

$$M_{SR_0} = M_{RS_0} = M_{RT_0} = M_{TR_0} = M_{ST_0} = M_{TS_0} = M_o \qquad \ldots (2.57)$$

pa kad uzmemo u obzir međusobni pomak osi faznih namota, međuinduktiviteti iznose

$$M_{RS} = M_{SR} = -M_o + L_1 \cos(2\vartheta - 120^\circ) \qquad \ldots (2.58a)$$
$$M_{ST} = M_{TS} = -M_o + L_1 \cos 2\vartheta \qquad \ldots (2.58b)$$
$$M_{TR} = M_{RT} = -M_o + L_1 \cos(2\vartheta + 120^\circ) \qquad \ldots (2.58c)$$

I sada se promjena međuinduktiviteta u ovisnosti o položaju rotora dobro poklapa s promjenom određenom prema (2.58). To pokazuje i sl. 2.24 (Lit. 4), koja vrijedi za isti agregat kao i sl. 2.23.

Induktiviteti namota na rotoru L_m, L_{pd}, L_{pq} konstantni su uz već spomenute pretpostavke (zanemarenje utjecaja utora na statoru i zanemarenje zasićenja željeza). To vrijedi i za međuinduktivitet M_{mpd} između uzbudnog namota i uzdužnog prigušnog namota.

Međuinduktivitet između uzbudnog namota i namota faze R bit će najveći kad se uzdužna os poklopi s osi faze R. Zakretanjem za 180° od toga položaja bit će postignut isti međuinduktivitet, ali suprotna predznaka. Promjena je sinusna. Međuinduktivitet između faze R i uzbudnog namota iznosi, dakle

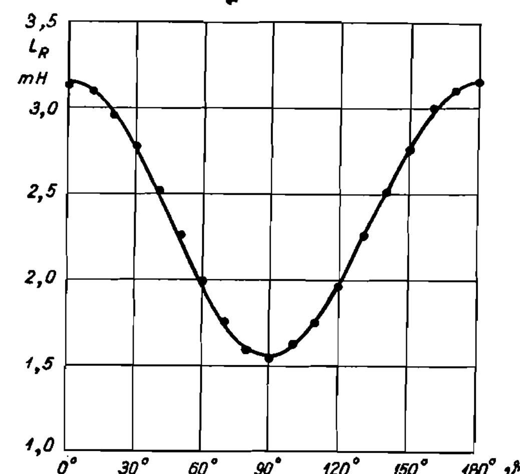
$$M_{mR} = M_m \cos\vartheta \qquad \ldots (2.59)$$

gdje je M_m maksimalna vrijednost međuinduktiviteta. Ako uzmemo u obzir pomak među osima pojedinih faza, te činjenicu da se za sve faze pojavljuje isti maksimalni međuinduktivitet, međuinduktiviteti između uzbudnog namota i pojedinih faza iznose

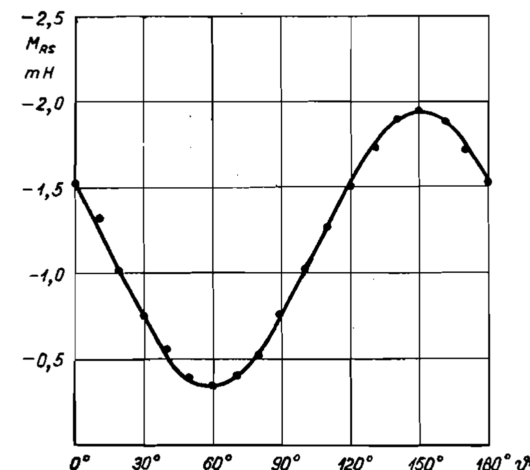
$$M_{mR} = M_{Rm} = M_m \cos\vartheta \qquad \ldots (2.59a)$$
$$M_{mS} = M_{Sm} = M_m \cos(\vartheta - 120^\circ) \qquad \ldots (2.59b)$$
$$M_{mT} = M_{Tm} = M_m \cos(\vartheta + 120^\circ) \qquad \ldots (2.59c)$$

Potpuno iste odnose imamo za međuinduktivitete između uzdužnog prigušnog namota i namota pojedinih faza, pa je

$$M_{pdR} = M_{Rpd} = M_{pd} \cos\vartheta \qquad \ldots (2.60a)$$
$$M_{pdS} = M_{Spd} = M_{pd} \cos(\vartheta - 120^\circ) \qquad \ldots (2.60b)$$
$$M_{pdT} = M_{Tpd} = M_{pd} \cos(\vartheta + 120^\circ) \qquad \ldots (2.60c)$$



Slika 2.23. Primjer promjene induktiviteta faze R u ovisnosti o položaju rotora. Tačke prikazuju rezultate mjerenja na sinhronom motoru 15 kVA, 220 V, 1800 okr/min. Mjerene vrijednosti dobro se poklapaju s teoretskom promjenom $L_R = 2{,}36 + 0{,}796 \cos(2\vartheta)$ mH (Lit. 4)



Slika 2.24. Primjer promjene međuinduktiviteta između faze R i S u ovisnosti o položaju rotora. Tačke prikazuju rezultate mjerenja na sinhronom motoru 15 kVA, 220 V, 1800 okr/min. Mjerene vrijednosti dobro se poklapaju s teoretskom promjenom $M_{RS} = -1{,}14 + 0{,}796 \cos(2\vartheta - 120^\circ)$ mH (Lit. 4)

Konačno, slične odnose imamo za međuinduktivitete između poprečnog prigušnog namota i namota pojedinih faza, ali s tom razlikom da je poprečna os pomaknuta za 90°, pa je

$$M_{pqR} = M_{Rpq} = -M_{pq} \sin \vartheta \qquad \ldots (2.61a)$$

$$M_{pqS} = M_{Spq} = -M_{pq} \sin (\vartheta - 120°) \qquad \ldots (2.61b)$$

$$M_{pqT} = M_{Tpq} = -M_{pq} \sin (\vartheta + 120°) \qquad \ldots (2.61c)$$

U relacijama (2.60) i (2.61) M_{pd} i M_{pq} znače maksimalne međuinduktivitete.

Uvrštavanjem vrijednosti induktiviteta i međuinduktiviteta u izraze za tokove (2.38), dobivamo za tokove obuhvaćene faznim namotima

$$\varphi_R = -L_o i_R + M_o (i_S + i_T) - L_1 i_R \cos 2\vartheta - \\ - L_1 i_S \cos (2\vartheta - 120°) - L_1 i_T \cos (2\vartheta + 120°) + \\ + (M_m i_m + M_{pd} i_{pd}) \cos \vartheta - M_{pq} i_{pq} \sin \vartheta \qquad \ldots (2.62a)$$

$$\varphi_S = -L_o i_S + M_o (i_R + i_T) - L_1 i_R \cos (2\vartheta - 120°) - \\ - L_1 i_S \cos (2\vartheta - 120°) - L_1 i_T \cos 2\vartheta + \\ + (M_m i_m + M_{pd} i_{pd}) \cos (\vartheta - 120°) - \\ - M_{pq} i_{pq} \sin (\vartheta - 120°) \qquad \ldots (2.62b)$$

$$\varphi_T = -L_o i_T + M_o (i_R + i_S) - L_1 i_R \cos (2\vartheta + 120°) - \\ - L_1 i_S \cos 2\vartheta - L_1 i_T \cos (2\vartheta + 120°) + \\ + (M_m i_m + M_{pd} i_{pd}) \cos (\vartheta + 120°) - \\ - M_{pq} i_{pq} \sin (\vartheta + 120°) \qquad \ldots (2.62c)$$

Uvrštavanjem u (2.39) vrijednosti za induktivitete i međuinduktivitete dobivamo izraze za tokove obuhvaćene namotima na rotoru

$$\varphi_m = -M_m [i_R \cos \vartheta + i_S \cos (\vartheta - 120°) + \\ + i_T \cos (\vartheta + 120°)] + L_m i_m + M_{mpd} i_{pd} \qquad \ldots (2.63a)$$

$$\varphi_{pd} = -M_{pd} [i_R \cos \vartheta + i_S \cos (\vartheta - 120°) + \\ + i_T \cos (\vartheta + 120°)] + M_{mpd} i_m + L_{qd} i_{pd} \qquad \ldots (2.63b)$$

$$\varphi_{pq} = -M_{pq} [i_R \sin \vartheta + i_S \sin (\vartheta - 120°) + \\ + i_T \sin (\vartheta + 120°)] + L_{pq} i_{pq} \qquad \ldots (2.63c)$$

Izrazi za tokove u sinhronom generatoru mogu se znatno pojednostavniti transformacijom varijabla. To znači, uvest će se fiktivne struje definirane stvarnim strujama, pa će se — u našem slučaju — tokovi prikazati pomoću novih varijabla. Jednadžbe se tada mogu riješiti za nove varijable, a iz tih rješenja određuju se — poznavajući vezu između novih i starih varijabla — stvarne struje. Analogno se mogu uvesti fiktivni tokovi i fiktivni naponi. Supstituciju novih varijabla treba — u općem slučaju — promatrati kao posve matematičku operaciju, pa nije ni potrebna fizikalna interpretacija fiktivnih odnosa supstituiranih veličina. U ovom slučaju, međutim, upotrebljena transformacija varijabla može se fizikalno interpretirati, o čemu će još biti govora. Upoznajmo se prije toga s novim fiktivnim strujama, s kojima ćemo zamijeniti stvarne struje u statorskim namotima. Stvarne struje možemo prikazati izrazima u kojima su i_d, i_q i i_o nove fiktivne struje

$$i_R = i_d \cos \vartheta - i_q \sin \vartheta + i_o \qquad \ldots (2.64a)$$

$$i_S = i_d \cos (\vartheta - 120°) - i_q \sin (\vartheta - 120°) + i_o \qquad \ldots (2.64b)$$

$$i_T = i_d \cos (\vartheta + 120°) - i_q \sin (\vartheta + 120°) + i_o \qquad \ldots (2.64c)$$

Struje u rotorskim namotima ostaju nepromijenjene.

Ako izraz za i_R (2.64a) pomnožimo sa $\cos \vartheta$, onaj za i_S (2.64b) sa $\cos (\vartheta - 120°)$, a izraz za i_T (2.64c) sa $\cos (\vartheta + 120°)$, te ako sve tri tako dobivene jednadžbe zbrojimo, dobit ćemo novu varijablu i_d. Na isti način dobivamo novu struju i_q, s razlikom da jednadžbe (2.64) treba množiti sa $\sin \vartheta$, $\sin (\vartheta - 120°)$, odnosno sa $\sin (\vartheta + 120°)$. Nova struja i_o dobiva se zbrajanjem triju jednadžba (2.64). Prilikom određivanja novih struja i_d, i_q i i_o treba uzeti u obzir i slijedeće relacije

$$\cos^2 \vartheta + \cos^2 (\vartheta - 120°) + \cos^2 (\vartheta + 120°) = \frac{3}{2} \qquad \ldots (2.65a)$$

$$\sin^2 \vartheta + \sin^2 (\vartheta - 120°) + \sin^2 (\vartheta + 120°) = \frac{3}{2} \qquad \ldots (2.65b)$$

$$\sin \vartheta \cos \vartheta + \sin (\vartheta - 120°) \cos (\vartheta - 120°) + \\ + \sin (\vartheta + 120°) \cos (\vartheta + 120°) = 0 \qquad \ldots (2.65c)$$

$$\cos \vartheta + \cos (\vartheta - 120°) + \cos (\vartheta + 120°) = 0 \qquad \ldots (2.65d)$$

$$\sin \vartheta + \sin (\vartheta - 120°) + \sin (\vartheta + 120°) = 0 \qquad \ldots (2.65e)$$

Nove su struje, dakle

$$i_d = \frac{2}{3} [i_R \cos \vartheta + i_S \cos (\vartheta - 120°) + \\ + i_T \cos (\vartheta + 120°)] \qquad \ldots (2.66a)$$

$$i_q = -\frac{2}{3} [i_R \sin \vartheta + i_S \sin (\vartheta - 120°) + \\ + i_T \sin (\vartheta + 120°)] \qquad \ldots (2.66b)$$

$$i_o = \frac{1}{3} (i_R + i_S + i_T) \qquad \ldots (2.66c)$$

Kao što možemo provesti transformaciju varijabla za struje, tako možemo i za tokove. Za nove tokove φ_d, φ_q i φ_o možemo napisati izraze analogne izrazima (2.66) s tim, da mjesto i_R, i_S i i_T pišemo φ_R, φ_S i φ_T. Tada dobivamo

$$\varphi_d = \frac{2}{3} [\varphi_R \cos \vartheta + \varphi_S \cos (\vartheta - 120°) + \\ + \varphi_T \cos (\vartheta + 120°)] \qquad \ldots 2.67a)$$

$$\varphi_q = -\frac{2}{3}\,[\varphi_R \sin\vartheta + \varphi_S \sin(\vartheta - 120°) + \varphi_T \sin(\vartheta + 120°)] \qquad \ldots (2.67b)$$

$$\varphi_o = \frac{1}{3}\,(\varphi_R + \varphi_S + \varphi_T)$$

Uvrštavanjem vrijednosti za φ_R (2.62a), φ_S (2.62b) i φ_T (2.62c) dobivamo

$$\varphi_d = -(L_o + M_o + \frac{3}{2} L_1)\, i_d + M_m\, i_m + M_{pd}\, i_{pd} \qquad \ldots (2.68a)$$

$$\varphi_q = -(L_o + M_o - \frac{3}{2} L_1)\, i_q + M_{pq}\, i_{pq} \qquad \ldots (2.68b)$$

$$\varphi_o = -(L_o - 2\, M_o)\, i_o \qquad \ldots (2.68c)$$

Za tokove obuhvaćene namotima na rotoru prikazane pomoću novih struja dobivamo

$$\varphi_m = -\frac{3}{2} M_m\, i_d + L_m\, i_m + M_{mpd}\, i_{pd} \qquad \ldots (2.69a)$$

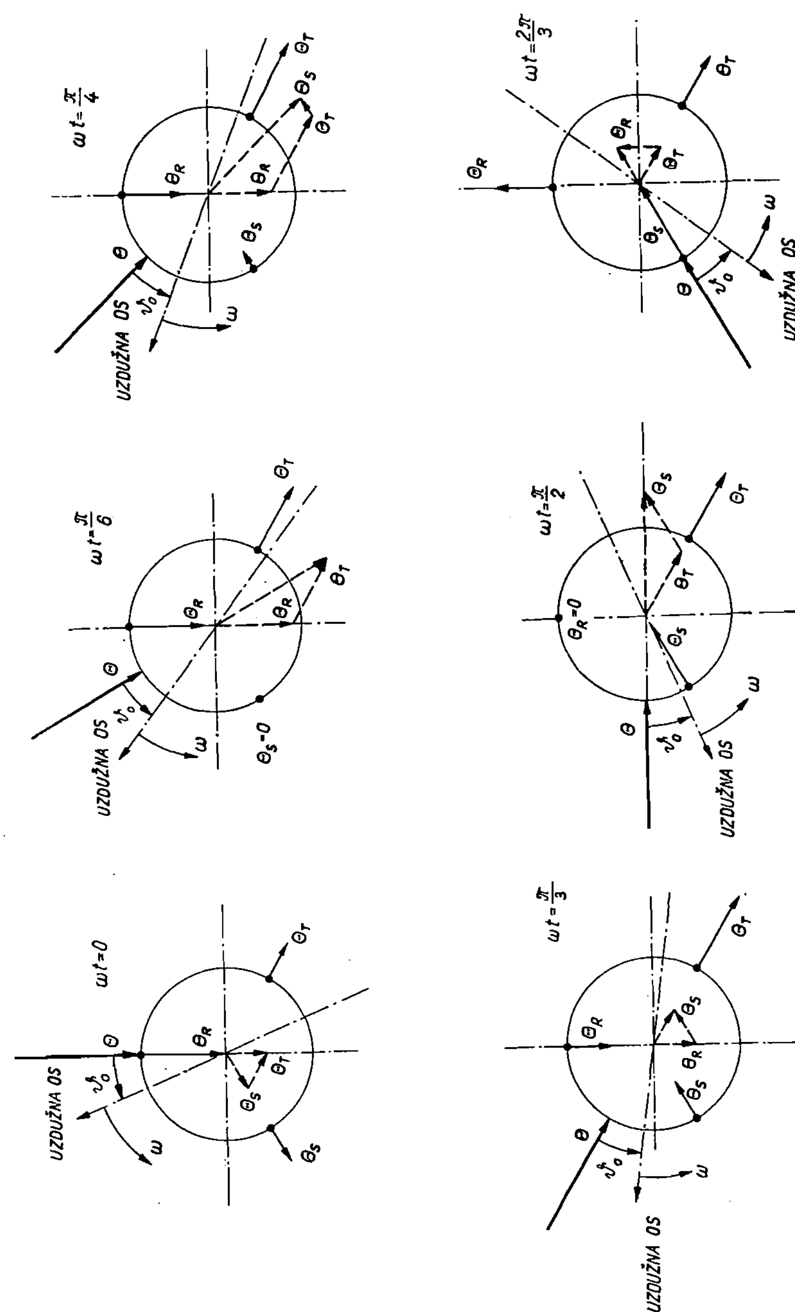
$$\varphi_{pd} = -\frac{3}{2} M_{pd}\, i_d + M_{mpd}\, i_m + L_{pd}\, i_{pd} \qquad \ldots (2.69b)$$

$$\varphi_{pq} = -\frac{3}{2} M_{pq}\, i_q + L_{pq}\, i_{pq} \qquad \ldots (2.69c)$$

Izraze (2.69) dobili smo kad smo mjesto veličina u uglatim zagradama u (2.63) uvrstitili i_d odnosno i_q prema (2.66a), odnosno (2.66b).

Jednadžbe za tokove postale su znatno jednostavnije jer su, prvo, svi koeficijenti konstante neovisni o položaju ϑ rotora, i drugo, postignuta je separacija varijabla (u ovom slučaju struja), jer se u pojedinim izrazima pojavljuje ili samo i_d ili samo i_q. Jednadžbe (2.68) omogućuju dalje da se uvedu nove veličine. Izrazi u zagradama predstavljaju induktivitete u novom sistemu varijabla, koji su konstante i neovisni o položaju rotora.

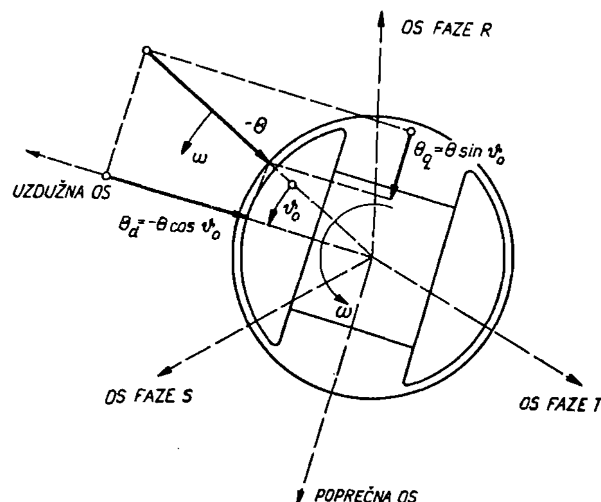
Sada možemo dati i fizikalnu sliku prilika na osnovu novih varijabla. Protjecanja namota svake faze sinusno su raspoređena uzduž oboda statora i mijenjaju se s promjenom momentane vrijednosti struja u pojedinim fazama. Uzevši u obzir da su osi namota međusobno pomaknute za 120°, kao rezultantno protjecanje dobiva se (Θ na sl. 2.25) protjecanje koje rotira sinhronom brzinom u istom smjeru kao i rotor generatora. Na sl. 2.25. prikazano je rezultantno protjecanje u smjeru od statora prema rotoru, jer je pretpostavljeno da protjecanje uzbudnog namota rotora, a prema tomu i tok proizveden od tog namota, ima smjer od rotora prema statoru. To je u skladu s jednadžbama (2.68), u kojima je kao pozitivni smjer toka uzet smjer od rotora prema statoru. Budući da rezultantno protjecanje rotira istom brzinom kao i rotor, rezultantno protjecanje može se rastaviti u dvije komponente: uzdužnu $\Theta_d = -\Theta \cos\vartheta_o$ i poprečnu $\Theta_q = +\Theta \sin\vartheta_o$ (sl. 2.26). Treba napomenuti da bismo do istog rezultata došli kad bismo komponente protjecanja određivali prema jednadžbama



Slika 2.25. Rezultantna protjecanja (Θ) kao suma protjecanja (Θ_R, Θ_S i Θ_T) triju faza, te položaj rezultantnog protjecanja prema uzdužnoj osi rotora

(2.62). Na sl. 2.26. protjecanje Θ označeno je kao negativno, jer su sve veličine koje se odnose na stator označene tim predznakom — vidi izraze (2.38), (2.39) itd. Osim toga treba naglasiti da je konstanta 2/3 samo posljedica odabrane transformacije, a ne utječe na konačni rezultat.

Prema tome struju i_d možemo zamisliti kao struju u fiktivnom namotu, koji rotira istim brojem okretaja kao i namoti na rotoru, i koji se nalazi u takvom položaju da njegova os pada uvijek zajedno s osi uzbudnog namota. Veličina struje u tom fiktivnom namotu koji rotira bit će tolika da će proizvoditi upravo toliko protjecanje u uzdužnoj osi, koliko će iznositi zbroj protjecanja struja u stvarnim faznim namotima. Na isti način možemo zamisliti struju i_q ali s razlikom da se os fiktivnog namota, kroz koji protječe ta struja, poklapa s poprečnom osi rotora. Struja i_o identična je s nultom komponentom struje i pojavljuje se samo onda ako zbroj struja u trima fazama nije jednak nuli.



Slika 2.26. Rastavljanje rezultantnog protjecanja Θ na uzdužnu Θ_d i poprečnu Θ_q komponentu rezultantnog protjecanja statora

Struje i_d i i_q proizvode dakle tokove koji su stacionarni s obzirom na rotor, pa radi toga tim se tokovima suprotstavljaju konstantni magnetski otpori. Tok proizveden strujom i_d jednak je prvom članu na desnoj strani izraza (2.68a), pa je izraz u zagradi induktivitet fiktivnog rotirajućeg namota kroz koji protječe struja i_d. Taj induktivitet nazivamo uzdužnim sinhronim induktivitetom sinhronog generatora (L_d), a pomnožen s kružnom frekvencijom nazivamo ga **uzdužnom sinhronom reaktancijom**

$$X_d = \omega L_d = \omega \left(L_o + M_o + \frac{3}{2} L_1\right) \qquad \ldots (2.70a)$$

Analogno tome prvi je član na desnoj strani izraza (2.68b) tok proizveden strujom i_q, a izraz u zagradi jest induktivitet fiktivnog rotirajućeg namota kroz koji protječe struja i_q. Taj induktivitet nazivamo poprečnim sinhronim induktivitetom generatora (L_q), a reaktanciju koja mu odgovara **poprečnom sinhronom reaktancijom**

$$X_q = \omega L_q = \omega \left(L_o + M_o - \frac{3}{2} L_1\right) \qquad \ldots (2.70b)$$

Prema (2.68c) dobivamo **nultu reaktanciju**

$$X_o = \omega (L_o - 2 M_o). \qquad \ldots (2.70c)$$

Koristeći gore navedene induktivitete možemo izraze za tokove napisati u slijedećem obliku

$$\varphi_d = - L_d i_d + M_m i_m + M_{pd} i_{pd} \qquad \ldots (2.71a)$$

$$\varphi_q = - L_q i_q + M_{pq} i_{pq} \qquad \ldots (2.71b)$$

$$\varphi_o = - L_o i_o \qquad \ldots (2.71c)$$

dok izrazi za tokove obuhvaćene namotima na rotoru ostaju nepromijenjeni (2.69).

Napon na stezaljkama uzbudnog namota možemo prikazati relacijom

$$v_m = \frac{d \varphi_m}{dt} + i_m r_m \qquad \ldots (2.72a)$$

dok su prigušni namoti kratko spojeni, pa je

$$o = \frac{d \varphi_{pd}}{dt} + i_{pd} r_{pd} \qquad \ldots (2.72b)$$

$$o = \frac{d \varphi_{pq}}{dt} + i_{pq} r_{pq} \qquad \ldots (2.72c)$$

Uvođenjem operatora $p = d/dt$ za Laplaceovu transformaciju (Lit. 10. i 11) možemo jednadžbe (2.72) napisati u obliku

$$v_m = p \varphi_m + i_m r_m \qquad \ldots (2.73a)$$

$$o = p \varphi_{pd} + i_{pd} r_{pd} \qquad \ldots (2.73b)$$

$$o = p \varphi_{pq} + i_{pq} r_{pq} \qquad \ldots (2.73c)$$

Uvrštavanjem izraza (2.69) u (2.73) dolazimo do izraza

$$v_m = - \frac{3}{2} i_d p M_m + i_m (p L_m + r_m) + i_{pd} p M_{mpd} \qquad \ldots (2.74a)$$

$$o = - \frac{3}{2} i_d p M_{pd} + i_m p M_{mpd} + i_{pd} (p L_{pd} + r_{pd}) \qquad \ldots (2.74b)$$

$$o = - \frac{3}{2} i_q p M_{pq} + i_{pq} (p L_{pq} + r_{pq}) \qquad \ldots (2.74c)$$

Iz tih jednadžbi možemo odrediti i_m, i_{pd} i i_{pq}, pa uvrštavanje u jednadžbe (2.71) dobivamo slijedeći izraz za tok u uzdužnoj osi

$$\varphi_d = v_m \frac{p(L_{pd} M_m - M_{pd} M_{mpd}) + M_m r_{pd}}{A(p)} -$$

$$- i_d \left\{ L_d - \frac{3}{2} \frac{1}{A(p)} \left[p^2 (L_{pd} M^2_m - 2 M_m M_{pd} M_{mpd} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + L_m M^2_{pd}) + p (M^2_m r_{pd} + M^2_{pd} r_m) \right] \right\} \qquad \ldots (2.75)$$

gdje je

$$A(p) = p^2 (L_m L_{pd} - M^2_{mpd}) +$$
$$+ p (L_m r_{pd} + L_{pd} r_m) + r_m r_{pd} \qquad \ldots (2.76)$$

Za tok u poprečnoj osi dobivamo

$$\varphi_q = - i_q \left(L_q - \frac{3}{2} \frac{p M^2_{pq}}{p L_{pq} + r_{pq}} \right) \qquad \ldots (2.77)$$

U izrazu za tok u uzdužnoj osi imamo dva člana: prvi predstavlja udio protjecanja uzbudnog namota, a drugi udio protjecanja struje i_d u stvaranju uzdužne komponente toka. Prema tome je izraz u vitičastoj zagradi induktivitet, koji nazivamo uzdužnim induktivitetom, odnosno — pomnoženog s kružnom frekvencijom — uzdužnom reaktancijom sinhronog generatora. Za uzdužnu reaktanciju dakle vrijedi relacija

$$X_d(p) = X_d -$$

$$- \frac{3}{2} \omega \left[\frac{p^2 (L_{pd} M^2_m - 2 M_m M_{pd} M_{mpd} + L_m M^2_{pd})}{p^2 (L_m L_{pd} - M^2_{mpd}) + p (L_m r_{pd} + L_{pd} r_m) + r_m r_{pd}} + \right.$$

$$\left. + \frac{p (M^2_m r_{pd} + M^2_{pd} r_m)}{p^2 (L_m L_{pd} - M^2_{mpd}) + p (L_m r_{pd} + L_{pd} r_m) + r_m r_{pd}} \right] \qquad \ldots (2.78)$$

Vrijednost funkcije u momentu $t = 0$ dobit ćemo ako postavimo $p = \infty$, pa je

$$X_d(\infty) = X_d'' = X_d -$$

$$- \frac{3}{2} \omega \frac{L_{pd} M^2_m - 2 M_m M_{pd} M_{mpd} + L_m M^2_{pd}}{L_m L_{pd} - M^2_{mpd}} \qquad \ldots (2.79)$$

Izraz (2.79) predstavlja reaktanciju u trenutku nastanka kratkog spoja, pa je ona nazvana **početnom (subtranzientnom) uzdužnom reaktancijom** sinhronog generatora.

Reaktancija generatora funkcija je vremena, pa njezinu vrijednost u stacionarnom pogonu za $t = \infty$ određujemo ako u (2.78) uvrstimo $p = 0$. Tada dobivamo

$$X_d(0) = X_d. \qquad \ldots (2.80)$$

Prema tome u stacionarnom pogonu reaktancija sinhronog generatora ima već u (2.70a) određenu vrijednost, koja je nazvana **uzdužnom sinhronom reaktancijom.**

Iz (2.77) dobivamo poprečnu reaktanciju — vrijednost u zagradama pomnožena s kružnom frekvencijom

$$X_q(p) = X_q - \frac{3}{2} \omega \frac{p M^2_{pq}}{p L_{pq} + r_{pq}} \qquad \ldots (2.81)$$

pomoću koje možemo odrediti **početnu (subtranzientnu) poprečnu reaktanciju** sinhronog generatora, ako postavimo $p = \infty$,

$$X_q(\infty) = X_q'' = X_q - \frac{3}{2} \omega \frac{M^2_{pq}}{L_{pq}} \qquad \ldots (2.82)$$

Uz $p = 0$ dobivamo **poprečnu sinhronu reaktanciju**

$$X_q(0) = X_q$$

koja je već definirana relacijom (2.70b).

U praktičkim računima upotrebljava se i prelazna (tranzientna) reaktancija sinhronog generatora, koju možemo definirati kao početnu reaktanciju kad ne postoje prigušni namoti na rotoru. U tom bi slučaju jednadžbe tokova — analogno izrazima (2.69) i (2.71) — glasile

$$\varphi_d = - L_d i_d + M_m i_m \qquad \ldots (2.83a)$$

$$\varphi_q = - L_q i_q \qquad \ldots (2.83b)$$

$$\varphi_m = - \frac{3}{2} M_m i_d + L_m i_m \qquad \ldots (2.83c)$$

dok bi naponska jednadžba — analogna izrazu (2.74a) — glasila

$$v_m = - \frac{3}{2} i_d p M_m + i_m (p L_m + r_m). \qquad \ldots (2.84)$$

Uvrštavanje i_m iz (2.84) u (2.83a) dobivamo izraz za tok u uzdužnoj osi

$$\varphi_d = v_m \frac{M_m}{p L_m + r_m} - i_d \left(L_d - \frac{3}{2} \frac{p M^2_m}{p L_m + r_m} \right) \qquad \ldots (2.85)$$

pa je i izraz za uzdužnu reaktanciju generatora bez prigušnih namota na rotoru

$$X_d'(p) = X_d - \frac{3}{2} \omega \frac{p M^2_m}{p L_m + r_m} \qquad \ldots (2.86)$$

Postavljanjem $p = \infty$ dolazimo do reaktancije u momentu nastanka kratkog spoja za generator bez prigušnih namota, koju nazivamo **prelaznom (tranzientnom) uzdužnom reaktancijom** sinhronog generatora

$$X_d'(\infty) = X_d' = X_d - \frac{3}{2} \omega \frac{M^2_m}{L_m} \qquad \ldots (2.87)$$

Sinhronu uzdužnu reaktanciju dobivamo za $p = 0$, a ona je jednaka onoj generatora s prigušnim namotima (2.70a) i (2.80), jer se u stacionarnom pogonu generator jednako vlada i s prigušnim namotima kao i bez njih, budući da u stacionarnom pogonu kroz prigušne namote ne protječe struja.

Poprečni induktivitet za generator bez prigušnih namota konstantna je veličina, jer u poprečnoj osi rotora nema namota. Radi toga je

$$L_q'(\infty) = L_q'(0) \qquad \dots (2.88)$$

pa je **prelazna (tranzientna) poprečna reaktancija** jednaka sinhronoj poprečnoj reaktanciji

$$X_q' = X_q, \qquad \dots (2.89)$$

koja je već definirana relacijom (2.70b).

Da odredimo reaktanciju generatora, koja se pojavljuje kad kroz generator teku struje inverznog sistema, zamislimo da smo na bilo koji način narinuli struje inverznog redoslijeda u statorski namot generatora. Struje u pojedinim fazama, dakle, iznose

$$i_R = I_m \cos \vartheta \qquad \dots (2.90a)$$

$$i_S = I_m \cos (\vartheta + 120°) \qquad \dots (2.90b)$$

$$i_T = I_m \cos (\vartheta - 120°) \qquad \dots (2.90c)$$

Uvrštavanjem u (2.66) dolazimo do komponenata struja u novom sistemu, pa je

$$i_d = I_m \cos 2\vartheta \qquad \dots (2.91a)$$

$$i_q = -I_m \sin 2\vartheta \qquad \dots (2.91b)$$

$$i_o = 0 \qquad \dots (2.91c)$$

Uz kratkospojeni uzbudni namot ($v_m = 0$) jednadžbe uzdužnog i poprečnog toka — prema (2.75) i (2.77) uzevši u obzir da je $p = \infty$, a uvodeći oznake L_d'' i L_q'' kao početne induktivitete — glase

$$\varphi_d = -i_d L_d'' \qquad \dots (2.92a)$$

$$\varphi_q = -i_q L_q'' \qquad \dots (2.92b)$$

$$\varphi_o = 0 \qquad \dots (2.92c)$$

Induktivitet L_d'' definiran je relacijom (2.79), a L_q'' relacijom (2.82). Ako sada tok faze R prikažemo uzdužnom i poprečnom komponentom toka, polazeći od izraza analognog izrazu (2.64a), dolazimo do izraza

$$\varphi_R = -I_m \left[\frac{L_d'' + L_q''}{2} \cos \vartheta + \frac{L_d'' - L_q''}{2} \cos 3\vartheta \right] \qquad \dots (2.93)$$

Induktivitet faze za inverzni sistem struja — ako zanemarimo struju trostruke frekvencije, što možemo učiniti jer je ta struja malena u usporedbi sa strujom normalne frekvencije — jest

$$L_i = \frac{\varphi_R}{i_R} = \frac{L_d'' + L_q''}{2} \qquad \dots (2.94)$$

odnosno **inverzna reaktancija sinhronog generatora** jest

$$X_i = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \qquad \dots (2.95)$$

Inverznu reaktanciju mogli bismo odrediti (Lit. 7) uz pretpostavku da uz kratkospojeni uzbudni namot narinemo na stezaljke generatora trofazni napon inverznog redoslijeda. Ako i tada zanemarimo struje viših frekvencija, doći ćemo do slijedećeg izraza za inverznu reaktanciju

$$X_i = \frac{2 X_d'' X_q''}{X_d'' + X_q''} \qquad \dots (2.96)$$

Izraz (2.96) daje donju, a izraz (2.95) gornju granicu inverzne reaktancije. Razlika između ta dva izraza ovisi o omjeru X_q''/X_d''. Tako imamo za

X_q''/X_d''	X_i/X_d'' (2.96)	X_i/X_d'' (2.95)
1,0	1,000	1,000
1,2	1,100	1,090
1,4	1,200	1,167
1,6	1,300	1,230
2,0	1,500	1,333

Ta razlika postaje još manja ako uzmemo u obzir i reaktancije izvan generatora (Lit. 5).

Nulta reaktancija je već definirana relacijom (2.68c), pa ona iznosi

$$X_o = \omega (L_o - 2 M_o) \qquad \dots (2.97)$$

a može se javiti samo onda ako je nul-tačka generatora posredno ili neposredno uzemljena.

Reaktancije obično prikazujemo u relativnim veličinama (x), koje su definirane relacijom

$$x = X \frac{S_n}{U_n^2} \qquad \dots (2.98)$$

gdje su X reaktancija u omima, S_n nazivna snaga u MVA, a U_n linijski napon u kV. Relacija (2.98) izvodi se ovim razmatranjem. Kao relativnu reaktanciju možemo definirati omjer između pada napona u reaktanciji, kad kroz nju teče nazivna struja, te nazivnog faznog napona

$$x = \frac{X I_n}{V_n} \qquad \dots (2.99)$$

Množenjem brojnika i nazivnika sa $3 V_n$ dolazimo do relacije (2.98), jer je $3 V_n^2 = U_n^2$.

U tab. 2.1. navedene su granice i srednje vrijednosti relativnih reaktancija, prema podacima (Lit. 4. i Lit. 12). Podaci u njemačkoj literaturi (Lit. 2) nešto se razlikuju od onih u tab. 2.1.

TABLICA 2.1.

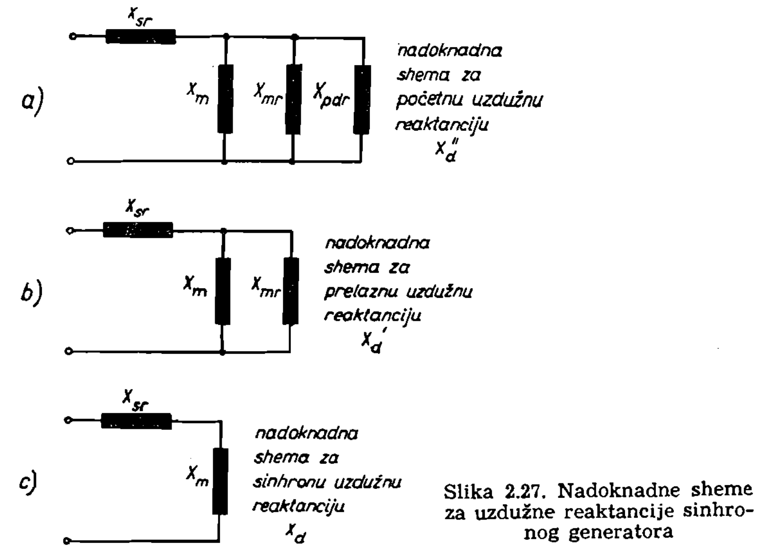
Prosječne relativne reaktancije (iznad crte) **i granice relativnih reaktancija** (ispod crte) **sinhronih generatora i kompenzatora**

Relativna reaktancija	Turbogeneratori	Generatori s izrazitim polovima (s prigušnim namotom)	Generatori s izrazitim polovima (bez prigušnog namota)	Sinhroni kompenzatori
x_d'' [1]	0,12 / 0,07—0,17	0,24 / 0,13—0,35	0,37 / 0,20—0,50	0,25 / 0,18—0,38
x_q''	0,15 / 0,10—0,20	0,34 / 0,23—0,45	0,75 / 0,40—1,00	0,30 / 0,23—0,43
x_d'	0,23 / 0,12—0,28	0,37 / 0,20—0,50	0,37 / 0,20—0,50	0,40 / 0,30—0,60
x_q'	1,08 / 0,92—1,42	0,75 / 0,40—1,00	0,75 / 0,40—1,00	1,15 / 0,95—1,40
x_d	1,10 / 0,95—1,45	1,15 / 0,60—1,50	1,15 / 0,60—1,50	1,80 / 1,50—2,20
x_q	1,08 / 0,92—1,42	0,75 / 0,40—1,00	0,75 / 0,40—1,00	1,15 / 0,95—1,40
x_i [1]	0,12 / 0,07—0,17	0,24 / 0,13—0,35	0,48 / 0,35—0,65	0,24 / 0,17—0,37
x_0 [1, 2]	0,03 / 0,01—0,10	0,18 / 0,02—0,21	0,18 / 0,02—0,21	0,14 / 0,03—0,15

1) Generatori s više okretaja obično imaju manju, dok generatori s manje okretaja veću reaktanciju.
2) Nulta reaktancija ovisi u velikoj mjeri o izvedbi namota na statoru, a kreće se između 0,1 x_d'' do 0,7 x_d''

D) Nadoknadne sheme reaktancija sinhronih generatora

U literaturi (Lit. 13. i 14) se često navode nadoknadne sheme, koje prikazuju reaktancije sinhronog generatora. Takve nadoknadne sheme prikazane su na sl. 2.27. Početna uzdužna reaktancija definirana je nadoknadnom shemom, u kojoj pored reaktancije rasipanja statorskog namota (X_{sr}) postoje, međusobno paralelno spojene (sl. 2.27a) reaktancija definirana međuinduktivitetom statora i rotora (X_m), reaktancija rasipanja uzbudnog namota (X_{mr}) i reaktancija rasipanja uzdužnog dijela prigušnog namota (X_{pdr}). Ako nema prigušnog namota, odnosno ako je njegovo djelovanje prestalo, možemo smatrati da je rasipna reaktancija tog namota postala neizmjerno velika, pa dolazimo do sheme prikazane na sl. 2.27b, koja predstavlja nadoknadnu shemu za prelaznu reaktanciju sinhronog generatora. U stacionarnom pogonu nema djelovanja rasipanja uzbudnog namota na stator, pa tada i reaktanciju rasipanja uzbudnog namota možemo smatrati neizmjerno velikom. Shema na sl. 2.27c predstavlja nadoknadnu shemu za sinhronu reaktanciju.



Slika 2.27. Nadoknadne sheme za uzdužne reaktancije sinhronog generatora

Uspoređujući nadoknadnu shemu za početnu uzdužnu reaktanciju X_d'' sa sl. 2.27. i s relacijom (2.79), koja je izvedena iz pojedinih induktiviteta i međuinduktiviteta nakon transformacije u nove varijable, moći ćemo iz (2.79) doći do X_d'' definirane nadoknadnom shemom sa sl. 2.27a, ako pretpostavimo da su svi međuinduktiviteti međusobno jednaki. Dalje, ako postavimo da je

$$X_{sr} = \omega L_o + \frac{3}{2}\,\omega L_1 \qquad \ldots (2.100a)$$

$$X_m = \omega M_o = \frac{3}{2}\,\omega M_m = \frac{3}{2}\,\omega M_{mpd} = \frac{3}{2}\,\omega M_{pd} \qquad \ldots (2.100b)$$

$$X_d = X_{sr} + X_m \qquad \ldots (2.100c)$$

te da su induktiviteti namota na rotoru

$$\frac{3}{2}\,\omega L_m = X_{mr} + X_m \qquad \ldots (2.100d)$$

$$\frac{3}{2}\,\omega L_{pd} = X_{pdr} + X_m \qquad \ldots (2.100e)$$

pa ako u (2.79) uvrstimo vrijednosti iz (2.100), dobit ćemo da je

$$X_d'' = X_{sr} + \frac{1}{\dfrac{1}{X_m} + \dfrac{1}{X_{mr}} + \dfrac{1}{X_{pdr}}} \qquad \ldots (2.101)$$

što baš odgovara nadoknadnoj shemi sa sl. 2.27a.

Na isti način dolazimo iz (2.87), koji daje vrijednost prelazne uzdužne reaktancije (X_d'), do relacije

$$X_d' = X_{sr} + \frac{1}{\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{mr}}} \qquad \ldots (2.102)$$

što je baš reaktancija određena prema nadoknadnoj shemi prikazanoj na sl. 2.27b.

Konačno je sinhrona uzdužna reaktancija (X_d) jednaka — prema sl. 2.27c — zbroju X_{sr} i X_m što odgovara relaciji (2.100c).

Analogno možemo i poprečne reaktancije prikazati nadoknadnim shemama (sl. 2.28). Sada međutim treba postaviti reaktanciju rasipanja statorskog namota (X_{sqr}) u poprečnoj osi i reaktanciju rasipanja poprečnog dijela prigušnog namota (X_{pqr}). Postavljajući

$$X_{sqr} = \omega L_o - \frac{3}{2}\, \omega L_1 \qquad \ldots (2.103a)$$

$$X_m = \omega M_o = \frac{3}{2}\, \omega M_m = \frac{3}{2}\, \omega M_{pq} \qquad \ldots (2.103b)$$

$$X_q = X_{sqr} + X_m \qquad \ldots (2.103c)$$

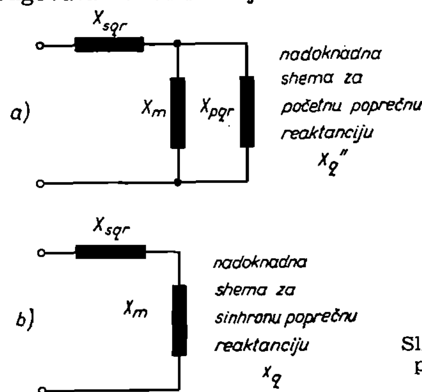
$$\frac{3}{2}\, \omega L_{pq} = X_{pqr} + X_m \qquad \ldots (2.103d)$$

te uvrštavajući navedene vrijednosti u (2.87), dolazimo do relacije

$$X_q'' = X_{sqr} + \frac{1}{\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{pqr}}} \qquad \ldots (2.104)$$

koja baš odgovara nadoknadnoj shemi na sl. 2.28a, što prikazuje početnu poprečnu reaktanciju sinhronog generatora.

Sinhrona poprečna reaktancija (X_q) određena je relacijom (2.103c), što odgovara nadoknadnoj shemi na sl. 2.28b.



Slika 2.28. Nadoknadne sheme za poprečne reaktancije sinhronog generatora

E. Struje kratkog spoja

Polazeći od struja i_d i i_q, koje možemo — kako je već spomenuto — zamisliti kao struje u fiktivnim rotirajućim namotima, dolazimo do struja u pojedinim fazama. U stacionarnom pogonu struje i_d i i_q su konstantne, a njih tjera napon — koji je također konstantan — a djeluje na krajevima tih zamišljenih rotirajućih namota. I za vrijeme prelazne pojave taj napon ostaje konstantan, jer možemo smatrati da je to narinuti napon. Veličina napona koja djeluje na uzdužni i poprečni namot ovisi o momentu nastanka kratkog spoja, pa napon možemo rastaviti u dvije komponente $V_d = V_m \cos\delta$ i $V_q = -V_m \sin\delta$. Kut δ ovisi o opterećenju generatora, pa je za neopterećeni generator $\delta = 0$.

Struju kratkog spoja i_d (proizvedenu naponom V_d), neposredno nakon nastanka kratkog spoja u fiktivnom namotu čija os pada zajedno s uzdužnom osi rotora, mogli bismo rastaviti na tri dijela, koja možemo prikazati relacijom

$$i_{d1} = V_m \cos\delta \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'}\right) + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d}\right) + \frac{1}{X_d}\right] \qquad \ldots (2.105a)$$

Skraćivanjem članova došli bismo do izraza $V_m \cos\delta / X_d''$, što predstavlja istosmjernu struju (u fiktivnom rotirajućem namotu!) koja bi tekla neposredno nakon nastanka kratkog spoja, a reaktancija namota u tom trenutku jednaka je početnoj uzdužnoj reaktanciji X_d''.

Prvi dio struje i_{d1} mogli bismo nazvati početnom komponentom struje, a dobivamo je kao razliku dviju struja: prve, koju tjera kroz reaktanciju X_d'' napon $V_m \cos\delta$ i druge, koju isti napon tjera kroz reaktanciju X_d'.

Početnu komponentu struje $\Delta I_{d1}''$ možemo dobiti iz relacije

$$\Delta I_{d1}'' = V_m \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'}\right) \cos\delta \qquad \ldots (2.106a)$$

Drugi dio struje, što možemo nazvati prelaznom komponentom struje, također je razlika struja, koju možemo prikazati relacijom

$$\Delta I_{d1}' = V_m \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d}\right) \cos\delta \qquad \ldots (2.106b)$$

a predstavlja drugi član izraza (2.105a). Konačno treći dio struje i_{d1} možemo nazvati stacionarnom komponentom struje

$$\Delta I_{d1} = \frac{V_m}{X_d} \cos\delta \qquad \ldots (2.106c)$$

što odgovara trećem članu izraza (2.105a).

Treba upozoriti međutim da su početna i prelazna komponenta struje definirane relacijama (2.106a) i (2.106b) samo razlike struja kratkog spoja, pa ih ne treba zamijeniti sa strujom kratkog spoja neposredno nakon njegovog nastanka i rasklopnom strujom o kojima će biti još govora u trećem poglavlju.

Osim struje i_{d1}, teče kroz isti fiktivni rotirajući namot i struja koju proizvodi tok koji je postojao u momentu nastanka kratkog spoja, a ne može se trenutno promijeniti. Taj tok vezan je uz stator, a prema njemu

fiktivni namot rotira sinhronom brzinom. Osim toga taj je tok proizvodio izmjenični napon u namotima statora prije nastanka kratkog spoja, pa će taj tok djelovati na fiktivni rotirajući namot kao da je na stezaljkama toga namota napon $V_m \cos(\omega t + \delta)$. Prema tome, u fiktivnom rotirajućem namotu teći će izmjenična struja, pa će radi tih brzih promjena namot tom izmjeničnom naponu suprotstavljati početnu uzdužnu reaktanciju X_d'' Izmjenična struja u fiktivnom rotirajućem namotu iznosit će, dakle

$$i_{d2} = -\frac{V_m}{X_d''}\cos(\omega t + \delta) \qquad \ldots (2.105b)$$

pa će ukupna struja u tom namotu biti

$$i_d = V_m\left\{\left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'}\right) + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d}\right) + \frac{1}{X_d}\right]\cos\delta - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{X_d''}\cos(\omega t + \delta)\right\} \qquad \ldots (2.107)$$

Tolika bi struja tekla neposredno nakon nastanka kratkog spoja i tolika bi i trajno ostala kad se reaktancija generatora ne bi mijenjala, odnosno kad namoti ne bi imali djelatan otpor. Ako taj utjecaj uzmemo u obzir, te ako znamo da su vremenske konstante međusobno različite kad se radi o promjenama različitih komponenata struje i_{d1} (2.105a), koje su definirane relacijama (2.106), kao i kad se radi o promjeni struje i_{d2} (2.105b), možemo odrediti veličine struje u svakom trenutku.

Detaljnjim razmatranjem (Lit. 5) dolazimo do izraza za pojedine vremenske konstante.

Vremenska konstanta početne komponente struje $\Delta I_{d1}''$ (2.106a) definirana je relacijom

$$T_d'' = \frac{L_{pd} - \frac{M^2_{mpd}}{L_m}}{r_{pd}}\,\frac{X_d''}{X_d'} \qquad \ldots (2.108a)$$

dok je vremenska konstanta prelazne komponente struje $\Delta I_{d1}'$ (2.106b)

$$T_d' = \frac{L_m}{r_m}\,\frac{X_d'}{X_d} \qquad \ldots (2.108b)$$

Vremenska konstanta stacionarne komponente struje neizmjerno je velika, jer se ta komponenta s vremenom ne mijenja. Vremenska konstanta struje i_{d2} — prema citiranim razmatranjima — iznosi

$$T_a = \frac{2\,X_d''\,X_q''}{\omega\, r\,(X_d'' + X_q'')} \qquad \ldots (2.108c)$$

U gore navedenim formulama imamo već ranije upotrebljene oznake, osim r, koji znači djelatni otpor namota statora.

Ako poznamo vremenske konstante generatora u praznom hodu, možemo pomoću njih definirati vremenske konstante početne i prelazne komponente struje. Vremenska konstanta generatora u praznom hodu, kad postoji prigušni namot, iznosi

$$T_{do}'' = \frac{L_{pd} - \frac{M^2_{mpd}}{L_m}}{r_{pd}} \qquad \ldots (2.109a)$$

gdje je uzet u obzir utjecaj uzbudnog namota na prigušni uzdužni namot. Vremenska kontanta generatora u praznom hodu, kad nema prigušnog namota, iznosi

$$T_{do}' = \frac{L_m}{r_m} \qquad \ldots (2.109b)$$

Uvođenjem vremenskih konstanta u praznom hodu u relacije (2.108) dobivamo

$$T_d'' = T_{do}''\,\frac{X_d''}{X_d'} \qquad \ldots (2.110a)$$

$$T_d' = T_{do}'\,\frac{X_d'}{X_d}\,. \qquad \ldots (2.110b)$$

Prema tome, uzevši u obzir promjenljivost struja za vrijeme kratkog spoja, struju i_d možemo napisati u obliku

$$i_d = V_m\left\{\left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'}\right) e^{-t/T_d''}\right.\right.$$

$$\left. + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d}\right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d}\right]\cos\delta -$$

$$\left. - \frac{1}{X_d''}\, e^{-t/T_a}\cos(\omega t + \delta)\right\} \qquad \ldots (2.111)$$

Na analogan način — kao struju i_{d1} u (2.105a) — možemo prikazati i struju i_{q1}

$$i_{q1} = -V_m \sin\delta\left[\left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_q}\right) + \frac{1}{X_q}\right]. \qquad \ldots (2.112a)$$

Veličina X_q' nije ušla u relaciju (2.112 a), jer je $X_q' = X_q$ (2.89). Struju i_{q1} opet možemo razdijeliti na komponente. Početna komponenta struje i_{q1} (koja je ujedno i prelazna komponenta) definirana je relacijom

$$\Delta I_{q1}'' = V_m\left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_q}\right)\sin\delta \qquad \ldots (2.113)$$

a predstavlja prvi član izraza (2.112a). Drugi član je stacionarna struja u fiktivnom rotirajućem namotu, čija se os poklapa s poprečnom osi rotora.

Analogno kao struju i_{d2}, možemo definirati i struju i_{q2}

$$i_{q2} = \frac{V_m}{X_q''}\sin(\omega t + \delta) \qquad \ldots (2.112b)$$

I sada je i_{q1} istosmjerna struja, a i_{q2} izmjenična, ali u fiktivnom rotirajućem namotu čija se os poklapa s poprečnom osi rotora. Ukupna je struja, dakle

$$i_q = -V_m \left\{ \left[\left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_q} \right) + \frac{1}{X_q} \right] \sin \delta - \frac{1}{X_q''} \sin (\omega t + \delta) \right\} \qquad \ldots (2.114)$$

Da se odredi promjena struja, potrebno je poznavati vremenske konstante. Vremenska konstanta početne struje $\Delta I_{q1}''$ (2.113) iznosi (Lit. 5)

$$T_q'' = \frac{L_{pq}}{r_{pq}} \frac{X_q''}{X_q} \qquad \ldots (2.115)$$

dok je za struju i_{q2} vremenska konstanta ista kao i za struju i_{d2}.

Ako uzmemo u obzir da je vremenska konstanta prigušnog namota u poprečnoj osi vremenska konstanta u praznom hodu u toj osi, možemo postaviti

$$T_{qo}'' = \frac{L_{pq}}{r_{pq}} \qquad \ldots (2.116)$$

pa je

$$T_q'' = T_{qo}'' \frac{X_q''}{X_q} \qquad \ldots (2.117)$$

Sada možemo napisati izraz za struju i_q uzevši u obzir i smanjenje struje za vrijeme trajanja kratkog spoja, pa je

$$i_q = -V_m \left\{ \left[\left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_q} \right) e^{-t/T_q''} + \frac{1}{X_q} \right] \sin \delta - \frac{1}{X_q''} e^{-t/T_a} \sin (\omega t + \delta) \right\} \qquad \ldots (2.118)$$

Pojednostavnimo izraze, pa promatrajmo struje uz pretpostavku da je generator u trenutku nastanka kratkog spoja bio neopterećen. To znači, postavimo da je $\delta = 0$. Tada su struje — prema (2.111) i (2.118)

$$i_d = V_m \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d''} e^{-t/T_a} \cos \omega t \right] \qquad \ldots (2.119a)$$

$$i_q = \frac{V_m}{X_q''} e^{-t/T_a} \sin \omega t \qquad \ldots (2.119b)$$

Pomoću tih struja — koristeći relacije analogne izrazima (2.64) — ali uzevši u obzir da kratki spoj nastaje u trenutku kad je uzdužna os zakrenuta za kut ϑ_o prema osi faze R, određuje se struja u fazi R ($i_o = 0$, jer se radi o tropolnom kratkom spoju)

$$i_R = i_d \cos (\omega t + \vartheta_o) - i_q \sin (\omega t + \vartheta_o) \qquad \ldots (2.120)$$

pa uvrštavanjem vrijednosti za i_d i i_q dobivamo

$$i_R = V_m \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d} \right] \cdot \cos (\omega t + \vartheta_o) - \frac{1}{2} V_m e^{-t/T_a} \left[\left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cos \vartheta_o + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) \cos (2 \omega t + \vartheta_o) \right] \qquad \ldots (2.121)$$

Za struje u ostalim fazama dobili bismo analogne izraze, s tom razlikom da za fazu S moramo mjesto $\omega t + \vartheta_o$ uvrstiti $\omega t + \vartheta_o - 120°$, mjesto ϑ_o uvrstiti $\vartheta_o - 120°$, a mjesto $2 \omega t + \vartheta_o$ postaviti $2 \omega t + \vartheta_o - 120°$ Za fazu T mjesto $- 120°$ treba postaviti $+ 120°$.

Prvi član u (2.121) jest transformirana istosmjerna struja koju smo zamišljali da teče u fiktivnom rotirajućem namotu, koja je, promatrana s obzirom na nepomične namote statora, izmjenična struja normalne frekvencije. Prvi član je dakle izmjenična komponenta struje, kako smo je nazvali u tač. 2.3b. Drugi član je istosmjerna komponenta struje kratkog spoja. On je posljedica izmjenične struje u oba fiktivna rotirajuća namota, jer je ta izmjenična struja, promatrana s obzirom na nepomični stator, istosmjerna struja. Treći član jest posljedica razlike između izmjeničnih struja u dva fiktivna rotirajuća namota, a ta razlika nastaje od različitih reaktancija u uzdužnoj i poprečnoj osi.

Za turbogenerator, u kojega praktički nema razlike između uzdužne i poprečne reaktancije ($X_d'' = X_q''$), možemo za struju u fazi R postaviti

$$i_R = V_m \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d} \right] \cos (\omega t + \vartheta_o) - \frac{V_m}{X_d''} e^{-t/T_a} \cos \vartheta_o \qquad \ldots (2.122)$$

Za generator s izrazitim polovima, ali bez prigušnog namota, struja u fazi R iznosi — jer je tada $X_d'' = X_d'$ i $X_q'' = X_q$ —

$$i_R = V_m \left[\left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d} \right] \cos (\omega t + \vartheta_o) - \frac{1}{2} V_m e^{-t/T_a} \cdot \left[\left(\frac{1}{X_d'} + \frac{1}{X_q} \right) \cos \vartheta_o + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_q} \right) \cos (2 \omega t + \vartheta_o) \right] \ldots (2.123)$$

Iz oscilograma struje kratkog spoja na izvedenom generatoru mogu se odrediti sve potrebe veličine koje dolaze u jednadžbi (2.121). U osci-

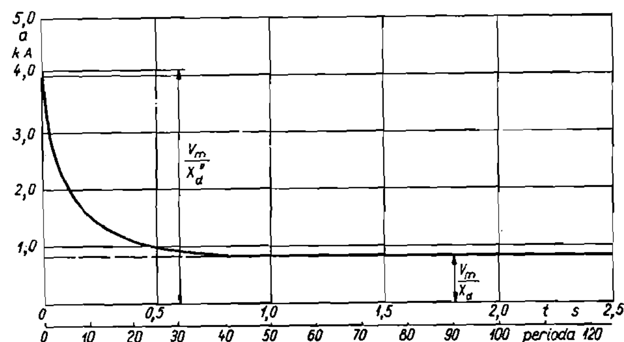
logramu struje kratkog spoja može se lako odijeliti istosmjerna komponenta od izmjenične, iz pomaka prigušene sinusoide od apscise. Nakon eliminiranja istosmjerne ostaje samo izmjenična komponenta, oko koje možemo nacrtati anvelopu, koja spaja maksimalne vrijednosti. Jednadžbu anvelope dobivamo ako uzmemo prvi član izraza (2.121) i postavimo da je $\cos(\omega t + \vartheta_o) = 1$, pa izraz za anvelopu glasi

$$a = V_m \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d} \right] \quad \ldots (2.124)$$

koju — uzevši u obzir relacije (2.106) uz $\delta = 0$, kao što smo i pretpostavili — možemo napisati i u obliku

$$a = \Delta I_{d1}'' \, e^{-t/T_d''} + \Delta I_{d1}' \, e^{-t/T_d'} + \Delta I_{d1}. \quad \ldots (2.125)$$

Iz nacrtane anvelope maksimalnih vrijednosti (sl. 2.29) možemo neposredno odrediti početnu uzdužnu reaktanciju i sinhronu uzdužnu re-



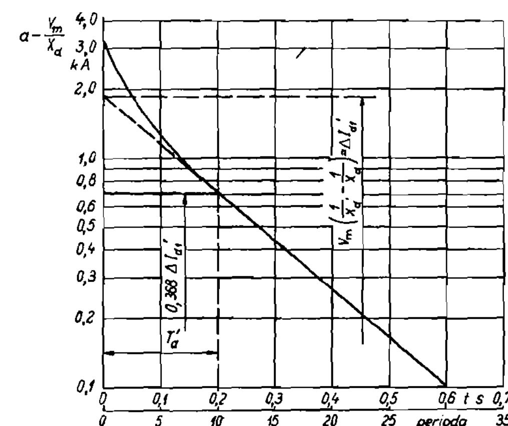
Slika 2.29. Primjer anvelope maksimalnih vrijednosti izmjenične komponente struje kratkog spoja

aktanciju. Maksimalna ordinata anvelope ($t = 0$) — prema (2.124) — predstavlja omjer V_m/X_d'', pa pomoću podataka o tjemenoj vrijednosti napona (V_m) prije nastanka kratkog spoja određujemo reaktanciju X_d''. Za stotinjak perioda struja praktički postiže stacionarnu vrijednost, pa možemo računati da je $t = \infty$. Tada vrijednost anvelope iznosi V_m/X_d, odakle se može izračunati X_d.

Pri određivanju prelazne uzdužne reaktancije potrebno je od vrijednosti anvelope odbiti veličinu V_m/X_d, pa tu novu vrijednost unijeti u polulogaritamski dijagram (sl. 2.30). U tom dijagramu nova anvelopa (sa smanjenim ordinatama) za veća vremena t predstavlja drugi član izraza (2.125), pa ako želimo za mala vremena t odijeliti $\Delta I_{d1}' \, e^{-t/T_d'}$ od prvog člana izraza (2.125), potrebno je produljiti pravac do sjecišta s ordinatom (crtkana dužina na sl. 2.30). Sjecište s osi ordinata maksimalna je vrijednost drugog člana izraza (2.120), koji — za $t = 0$ — iznosi

$$\Delta I_{d1}' = V_m \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \quad \ldots (2.126)$$

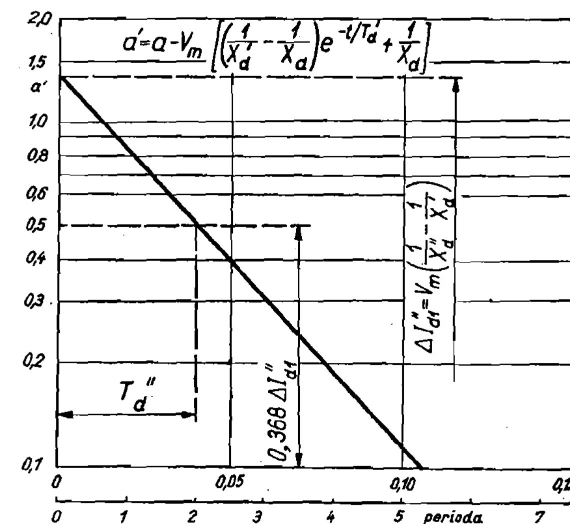
odakle određujemo prelaznu uzdužnu reaktanciju X_d', jer je već iz sl. 2.29. poznata reaktancija X_d. Iz dijagrama na sl. 2.30. određujemo i vremensku konstantu T_d' kako je prikazao na sl. 2.11. ili 2.12.



Slika 2.30. Primjer određivanja prelazne uzdužne reaktancije X_d' i vremenske konstante T_d' sinhronog generatora

Da odredimo vremensku konstantu T_d'', treba također u polulogaritamskom dijagramu (sl. 2.31) unijeti razlike između a i sume drugog i trećeg člana jednadžbe (2.125). Postupit ćemo kao pri određivanju vremenske konstante T_d'.

Istosmjernu komponentu struje kratkog spoja moći ćemo iskoristiti za određivanje vremenske konstante T_a na već opisani način, ali i za određivanje X_q''. Pri određivanju X_q'' treba međutim poznavati ϑ_o. Istosmjernu



Slika 2.31. Primjer određivanja vremenske konstante T_d'' sinhronog generatora

komponentu struje u fazi R (za $t = 0$) označimo sa I_{Ro}, a u fazi S sa I_{So}. Tada je prema (2.121)

$$I_{Ro} = -\frac{1}{2} V_m \left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cos \vartheta_o \qquad \ldots (2.127a)$$

$$I_{So} = -\frac{1}{2} V_m \left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cos (\vartheta_o - 120^\circ) \qquad \ldots (2.127b)$$

Dijeljenjem tih dvaju izraza moći ćemo odrediti kut ϑ_o iz relacije

$$\vartheta_o = \text{arc tg} \left(\frac{I_{So}}{I_{Ro} \sin 120^\circ} - \text{cotg } 120^\circ \right) \qquad \ldots (2.128a)$$

odnosno

$$\vartheta_o = \text{arc tg} \frac{1}{\sqrt{3}} \left(2 \frac{I_{So}}{I_{Ro}} + 1 \right) \qquad \ldots (2.128b)$$

Poznavajući kut ϑ_o kao i X_d'' iz relacije (2.127a), određujemo reaktanciju X_q''.

Vremenska konstanta T_a određuje se prema krivulji opadanja istosmjerne komponente, na već opisani način.

TABLICA 2.2

Prosječne vremenske konstante (iznad crte) **i granice vremenskih konstanta** (ispod crte) **u sekundama sinhronih generatora i kompenzatora**

Vremenska konstanta	Turbogeneratori	Generatori s izrazitim polovima (s prigušnim namotom)	Generatori s izrazitim polovima (bez prigušnog namota)	Sinhroni kompenzatori
T_{do}' [1]	5,0 / 2,0—10,0	3,0—5,0 / 1,5—10,0	3,0—5,0 / 1,5—10,0	9,0 / 6,0—14,0
T_d'	0,6 / 0,2—1,2	1,5 / 0,5—3,3	1,5 / 0,5—3,3	2,0 / 1,2—2,8
T_d'' [2]	0,035 / 0,02—0,05	0,035 / 0,01—0,05	—	0,035 / 0,02—0,04
T_a	0,13 / 0,04—0,24	0,15 / 0,03—0,25	0,30 / 0,10—0,50	0,17 / 0,10—0,30

1) Generator veće snage ima veću vremensku konstantu (Lit. 12)
2) Vremenska konstanta $T_q'' = T_d''$

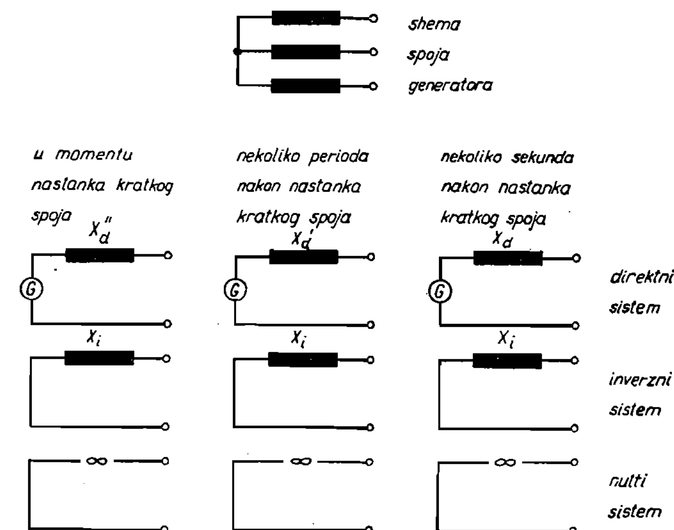
Prilikom analize oscilograma zanemarili smo struju dvostruke frekvencije, što je moguće, jer je njezina vrijednost malena.

Prosječne vrijednosti kao i granice unutar kojih se kreću vremenske konstante, navedene su u tab. 2.2.

F. Ekvivalentne sheme sinhronog generatora

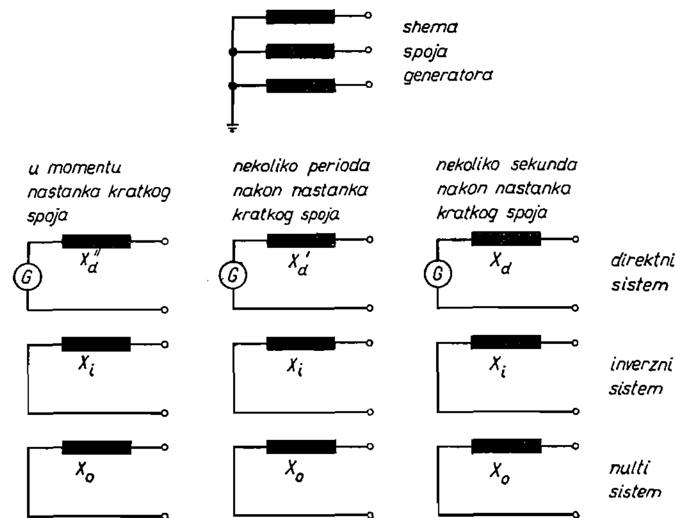
Pri izračunavanju struja kratkog spoja u mrežama normalno se ne pravi razlika između uzdužnih i poprečnih reaktancija generatora s izrazitim polovima. To je uvedeno radi pojednostavnjenja računa, i radi toga jer ne nastaju znatnije razlike uvođenjem tog pojednostavnjenja, a pogotovo jer se utjecaj te razlike to više smanjuje, što se između generatora i mjesta kratkog spoja nalazi veća reaktancija (transformatori, vodovi). Prema tome pri određivanju struja kratkog spoja u mrežama pretpostavlja se da su svi generatori turbogeneratori, pa za njih vrijedi izraz (2.122).

Prema ranije izloženom možemo smatrati da u trenutku nastanka kratkog spoja generator ima početnu reaktanciju (X_d''), nakon nekoliko perioda nestaje struja definirana prvim članom u uglatim zagradama izraza (2.122), pa se može smatrati da generator ima prelaznu reaktanciju (X_d'). To nije sasvim tačno, jer je reaktancija X_d' definirana prema sl. 2.30. za moment $t = 0$. Takvu aproksimaciju međutim možemo prihvatiti, jer je nakon nekoliko perioda $t \ll T_d'$ (tab. 2.2). Teoretski za $t = \infty$, praktički nakon nekoliko sekunda, generator se vlada kao da ima reaktanciju X_d. Prema tome ekvivalentna shema generatora u direktnom sistemu ovisi o momentu promatranja, jer se reaktancija za direktni sistem mijenja s vremenom (sl. 2.32). Za slučaj da narinemo na stezaljke napon inverznog redoslijeda generator će se — kako smo vidjeli — vladati kao da ima reaktanciju X_i (2.96) i tu će reaktanciju imati cijelo vrijeme dok je narinut napon inverznog redoslijeda. Istu situaciju s obzirom na promjenljivost reaktancije imamo kad na stezaljke narinemo nulti napon (isti napon



Slika 2.32. Ekvivalentne sheme spoja generatora s izoliranom nul-tačkom

na sve tri stezaljke). Nulti napon može međutim protjerati struju kroz generator samo onda ako je nul-tačka generatora uzemljena. Prema tome za generator s neuzemljenom nul-tačkom nulta je reaktancija neizmjerno



Slika 2.33. Ekvivalentne sheme spoja generatora s uzemljenom nultačkom

velika ($X_o = \infty$, jer je struja jednaka nuli), dok je za generator s uzemljenom nul-tačkom nulta reaktancija X_o (2.97).

Na sl. 2.32. prikazane su ekvivalentne sheme za generator s izoliranom, a na sl. 2.33. ekvivalentne sheme za generator s uzemljenom nul-tačkom.

2.4 REAKTANCIJE TRANSFORMATORA

A. Dvonamotni transformatori

Iz pokusa kratkog spoja određujemo direktnu reaktaciju transformatora, koja je jednaka reaktanciji kratkog spoja. Pokus kratkog spoja izvodi se ovako (sl. 2.34): kratko se spoje sekundarne stezaljke, a na primarne se narine toliki trofazni napon da kroz namote teče nazivna struja. Omjerom tako definiranog napona V_{k1} (koji nazivamo naponom kratkog spoja) i nazivne struje I_{n1} definirana je direktna reaktancija transformatora

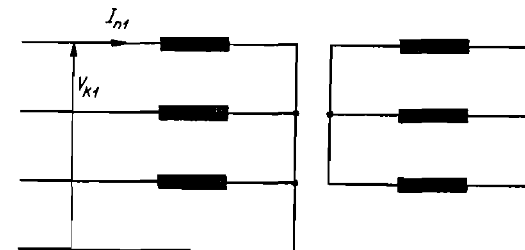
$$X_{d1} = \frac{V_{k1}}{I_{n1}} \qquad \ldots (2.129)$$

Reaktanciju transformatora možemo odrediti i pomoću relativnog napona kratkog spoja

$$u_k = \frac{V_{k1}}{V_{n1}} = \frac{U_{k1}}{U_{n1}} \qquad \ldots (2.130)$$

gdje su V_{n1} nazivni fazni, a U_{n1} nazivni linijski napon, dok je U_{k1} linijski napon kratkog spoja. Uvrštavanjem u (2.129) dobivamo

$$X_{d1} = u_k \frac{V_{n1}}{I_{n1}} = u_k \frac{U_{n1}}{\sqrt{3}\, I_{n1}} \qquad \ldots (2.131)$$



Slika 2.34. Shema spoja za pokus kratkog spoja transformatora

a množenjem brojnika i nazivnika sa U_{n1} dolazimo do izraza

$$X_{d1} = u_k \frac{U_{n1}^2}{S_n} \qquad \ldots (2.132)$$

koji je analogan izrazu (2.98).

Pri određivanju reaktancije transformatora nije svejedno da li se polazi od primarnog ili sekundarnog namota. Ako, naime, pokus kratkog spoja izvodimo tako da napon (sl. 2.34) narinemo na sekundarnu stranu, a primarni namot kratko spojimo, te ako pretpostavimo da je prenosni omjer U_{n1}/U_{n2}, nazivna struja sekundarnog namota bit će

$$I_{n2} = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} I_{n1} \qquad \ldots (2.133)$$

dok će napon kratkog spoja, potreban da protjera struju I_{n2}, biti

$$V_{k2} = \frac{U_{n2}}{U_{n1}} V_{k1} \qquad \ldots (2.134)$$

Dijeljenjem napona sa strujom dobivamo reaktanciju transformatora, polazeći sa sekundarne strane

$$X_{d2} = \frac{V_{k2}}{I_{n2}} = X_{d1} \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}} \right)^2 \qquad \ldots (2.135)$$

Prema tome reaktanciju transformatora, polazeći od sekundarne strane, razlikujemo od reaktancije promatrane s primarne strane. Relativni napon kratkog spoja međutim jednak je, bilo da se polazi od primarne, bilo od

sekundarne strane. Radi toga se kao karakteristična veličina transformatora i navodi relativni napon kratkog spoja (tab. 2.3). Napon kratkog spoja obično se navodi u procentima.

TABLICA 2.3.

Naponi kratkog spoja (u_k%) transformatora

Gornji nazivni napon kV	u_k %
6 do 20	3,5— 8
30	5 — 8
60	7 — 9
110	9 —11
220	11 —13

Prilikom određivanja struja kratkog spoja zanemarujemo struju magnetiziranja, jer je ona malena u usporedbi sa strujom kratkog spoja. U praznom hodu transformator ima znatno veću reaktanciju od reaktancije kratkog spoja. Ako sa I_m označimo struju praznog hoda pri nazivnom naponu V_{n1}, reaktancija transformatora u praznom hodu jest

$$X_m = \frac{V_{n1}}{I_m} \qquad \ldots (2.136)$$

Ako dalje uvedemo omjer

$$m = \frac{I_m}{I_{n1}} \qquad \ldots (2.136a)$$

te uzmemo u obzir (2.130), moći ćemo za (2.136) napisati

$$X_m = \frac{1}{m\ u_k} X_{d1} \qquad \ldots (2.137)$$

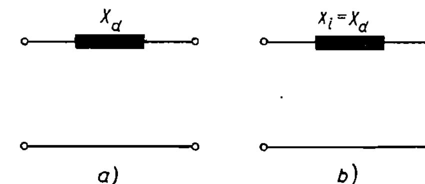
Postavimo li $m = 0{,}1$ i $u_k = 0{,}1$ što — kao srednja vrijednost — odgovara odnosima koje imamo za transformatore, dobit ćemo

$$X_m = 100\ X_{d1} \qquad \ldots (2.138)$$

Reaktancija praznog hoda je prema tome oko 100 puta veća od X_{d1}, pa i greška koja nastaje zanemarenjem struje magnetiziranja iznosi oko 1%.

Ako pokus kratkog spoja izvedemo prema shemi na sl. 2.34, ali sa dvije zamijenjene faze, dakle s inverznim redoslijedom faza, doći ćemo do iste reaktancije kratkog spoja kao i s direktnim redoslijedom faza. To znači da je inverzna reaktancija jednaka direktnoj, što vrijedi za sve dijelove mreže koji ne rotiraju.

U ekvivalentnim shemama transformator se može prikazati njegovom reaktancijom u direktnom i inverznom sistemu (sl. 2.35).

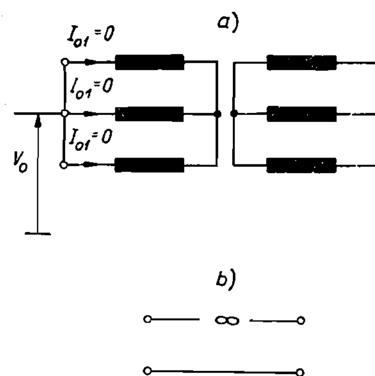


Slika 2.35. Ekvivalentne sheme transformatora: (a) u direktnom, (b) u inverznom sistemu

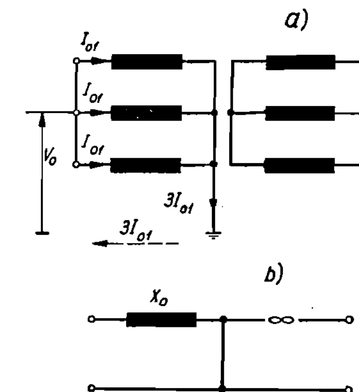
Sve navedeno vrijedi za transformatore bilo kakve izvedbe i bez obzira na spoj namotâ i uzemljenje nul-tačke. Nulta reaktancija međutim znatno ovisi o spoju, izvedbi i uzemljenju nul-tačke transformatora.

Promotrimo najprije transformator u spoju zvijezda-zvijezda. Pođimo od transformatora s izoliranim nul-tačkama (sl. 2.36). Narinemo li na primarni namot nulti sistem napona, dakle na sve tri stezaljke isti napon, kroz transformator neće proteći struja ma koliki bio narinuti napon. Strujni krug nije zatvoren, a na sva tri namota djeluje isti napon. Prema tome nulta reaktancija neizmjerno je velika, jer reaktanciju možemo odrediti kao omjer narinutog napona i struje koja teče kroz transformator.

Ako je nul-tačka primarnog namota uzemljena, strujni krug će biti zatvoren, jer tada uvijek pretpostavljamo da je izvor narinutog napona uzemljen (odnosno da su nul-tačke drugih transformatora uzemljene), pa će se struja zatvarati preko zemlje i uzemljenih nul-tačaka (sl. 2.37). Kolika će poteći struja, odnosno koliku će reaktanciju imati transfor-

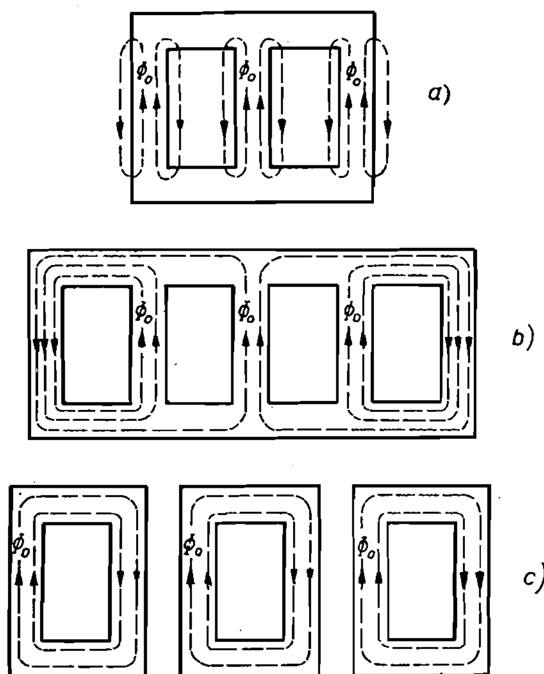


Slika 2.36. Shema spoja transformatora u spoju zvijezda-zvijezda s izoliranom nul-tačkom (a) i ekvivalentna shema spoja nultog sistema (b)



Slika 2.37. Shema spoja transformatora u spoju zvijezda-zvijezda s uzemljenom nul-tačkom jednog namota (a) i ekvivalentna shema spoja nultog sistema (b)

mator, ovisi o izvedbi transformatora. Svaka od struja proizvest će tok Φ_0 s tim, da su tokovi svih namota u fazi. U trofaznom transformatoru sa tri stupa (sl. 2.38a) tokovi se ne mogu zbog toga zatvoriti kroz željezo, već moraju tražiti put kroz zrak ili kotao transformatora. Tok mora da bude toliki da proizvede protuelektromotornu silu koja će držati ravnotežu narinutom naponu, a budući da se tokovi zatvaraju kroz zrak, potrebna struja morat će biti relativno velika u usporedbi sa strujom, koja bi tekla, kad bi se tokovi zatvarali kroz željezo. U trofaznom transformatoru s pet jezgri (sl. 2.38b) kao i u sklopu od tri jednofazna transformatora (sl. 2.38c), čiji su namoti spojeni u zvijezdu (sl. 2.37a), tokovi nultog sistema mogu se zatvoriti kroz željezo, pa potrebna struja odgovara struji magnetiziranja. U tim slučajevima (trofazni transformator s pet stupova ili sklop od tri jednofazna transformatora) nulta reaktancija je jednaka reaktanciji praznog hoda, koja je oko stotinu puta veća od reaktancije u direktnom sistemu, pa možemo smatrati da je neizmjerno velika, što odgovara pretpostavci o zanemarivanju struje magnetiziranja. Nasuprot tome trofazni transformator sa tri jezgre ima manju nultu reaktanciju, koja je 10 do 15 puta veća od reaktancije kratkog spoja.



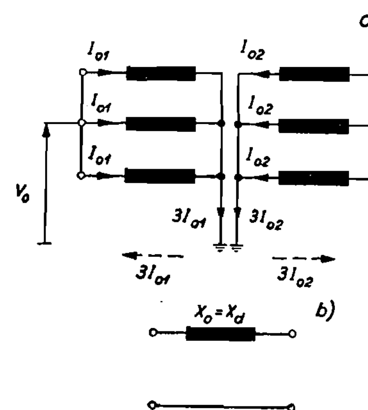
Slika 2.38. Tokovi nultog sistema: (a) u trofaznom transformatoru s tri jezgre, (b) u trofaznom transformatoru s pet jezgara i (c) u sklopu od tri jednofazna transformatora

To sve vrijedi onda ako napon nultog sistema narinemo na stezaljke namota, čija je nul-tačka uzemljena. Napon narinut na stezaljke namota, čija nul-tačka nije uzemljena, neće međutim uspjeti da protjera struju kroz namote, bez obzira na izvedbu transformatora, jer ćemo imati iste prilike kao na sl. 2.36. Ekvivalentna shema u nultom sistemu za trofazni transformator s tri jezgre s uzemljenom nul-tačkom jednog namota prikazana je na sl. 2.37b, dok za druge dvije izvedbe transformatora ekvivalentna shema odgovara sl. 2.36b.

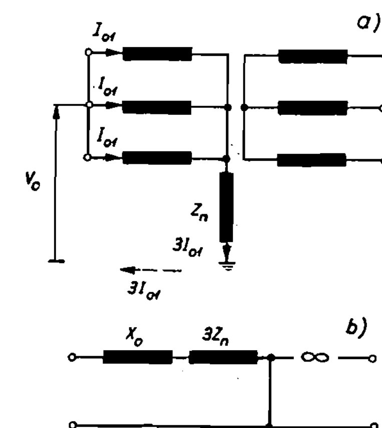
Uzemljenje obiju nul-tačaka transformatora (sl. 2.39a) omogućit će zatvaranje struja nultog sistema u oba namota, pa ćemo imati u transformatoru iste prilike kao pri opterećenom transformatoru ili kratkospojenom transformatoru, jer će se protjecanju u primarnim namotima suprotstavljati protjecanje u sekundarnim namotima. Radi toga je nulta reaktancija jednaka direktnoj reaktanciji transformatora (sl. 2.39b). Potpuno iste prilike imamo u slučaju kad se nulti sistem napona narine na sekundarnu stranu transformatora, pa je i ekvivalentna shema za oba slučaja ista.

U nekim slučajevima uzemljuje se nul-tačka transformatora preko impedancije Z_n. Kroz tu impedanciju protječe trostruka struja I_0 (sl. 2.40a), pa u ekvivalentnu shemu treba postaviti trostruku impedanciju Z_n (sl. 2.40b), da bi se osigurala vjernost prilika. Na sl. 2.40 prikazan je transformator s jednom uzemljenom nul-tačkom, a na sl. 2.41 s obje nul-tačke uzemljene preko impedancija.

Promotrimo sada transformator u spoju zvijezda-trokut. Ako nul-tačka zvijezde nije uzemljena, struje nultog sistema ne mogu se zatvoriti, bez obzira na to da li se nulti napon narine na stezaljke primarnog ili sekundarnog namota, pa možemo računati da je nulta reaktancija neizmjerno



Slika 2.39. Shema spoja transformatora u spoju zvijezda-zvijezda s uzemljenim nul-tačkama obaju namota (a) i ekvivalentna shema spoja nultog sistema (b)

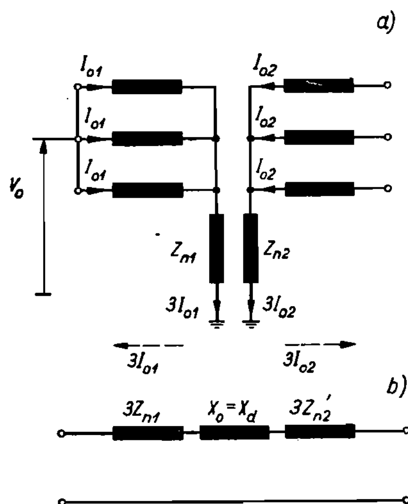


Slika 2.40. Shema spoja transformatora u spoju zvijezda-zvijezda s nul-tačkom jednog namota uzemljenom preko impedancije (a) i ekvivalentna shema spoja nultog sistema (b)

velika (sl. 2.42). Uzemljenjem nul-tačke bitno se mijenjaju odnosi. Struje I_{01} (sl. 2.43a) mogu se zatvoriti. Napon induciran u sekundarnom namotu protjerat će struje I_{02}, koje se mogu zatvoriti u namotu spojenom u trokut. Protjecanja primarnog namota bit će jednaka protjecanjima sekundarnog namota, pa ćemo imati iste prilike kao u opterećenom transformatoru, odnosno kao pri pokusu kratkog spoja. Radi toga je i nulta reaktancija jednaka direktnoj reaktanciji (sl. 2.43b). Ako međutim narinemo napon V_0 na namot spojen u trokut, imat ćemo prilike prikazane na sl. 2.42, pa će ekvivalentna shema izgledati kao na sl. 2.43b.

U slučaju da je nul-tačka transformatora zvijezda-trokut uzemljena preko impedancije Z_n kao na sl. 2.40, treba u ekvivalentnoj shemi na sl. 2.43 u seriju s reaktancijom X_0 dodati impedanciju $3\,Z_n$.

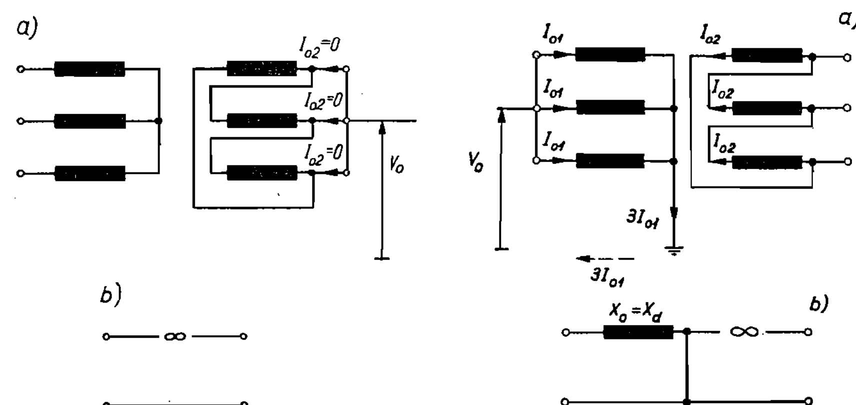
Konačno, da prikažemo sve mogućnosti spojeva dvonamotnih visokonaponskih transformatora spomenimo i transformator u spoju trokut-trokut, u kojemu se ne mogu ni u jednom slučaju zatvoriti struje nultog sistema, pa uvijek možemo računati da je nulta reaktancija neizmjerno velika.



Slika 2.41. Shema spoja transformatora u spoju zvijezda-zvijezda s nul-tačkama uzemljenim preko impedancija (a) i ekvivalentna shema spoja nultog sistema (b)

Veličina nulte reaktancije ovisi o naponu prema kojemu se promatra. Preračunavanje s napona na napon vrši se i sada prema relaciji (2.135). Ovdje još treba spomenuti da impedancije između nul-tačke i zemlje treba preračunati na isti napon kao i nultu reaktanciju, pa ih tek tako preračunate unijeti u ekvivalentnu shemu (npr. sl. 2.41b). Osim toga, ako želimo odrediti struje I_{02} (sl. 2.41. i 2.43) treba voditi računa ne samo o prijenosnom omjeru, već i o spoju transformatora. Za spoj zvijezda-zvijezda (sl. 2.41) struju I_{02} određujemo iz relacije

$$I_{02} = I_{01}\,\frac{U_{n1}}{U_{n2}} \qquad \ldots (2.139)$$



Slika 2.42. Shema spoja transformatora u spoju zvijezda-trokut s neuzemljenom nul-tačkom (a) i ekvivalentna shema spoja nultog sistema (b)

Slika 2.43. Shema spoja transformatora u spoju zvijezda-trokut s uzemljenom nul-tačkom (a) i ekvivalentna shema spoja nultog sistema (b)

jer je prijenosni omjer u tom slučaju jednak omjeru broja zavoja. Za spoj zvijezda-trokut treba međutim uzeti u obzir da je sekundarni namot spojen u trokut, pa za isti prijenosni omjer U_{n1}/U_{n2} ima $\sqrt{3}$ puta veći broj zavoja. Zbog toga struju I_{02} u ovom slučaju određujemo iz relacije

$$I_{02} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,I_{01}\,\frac{U_{n1}}{U_{n2}} \qquad \ldots (2.140)$$

B. Tronamotni transformatori

Nazivna snaga transformatora definirana je nazivnim naponom i nazivnom strujom, odnosno snagom za koju je transformator građen (Lit. 15), a naznačena je na natpisnoj pločici. Taj je podatak jednoznačan za dvonamotne transformatore, jer se transformacija može vršiti samo između dva namota. Za tronamotne transformatore jedan podatak o nazivnoj snazi nije dovoljan, već je potrebno definirati nazivne snage između najmanje dva para namota. Neka imamo npr. tronamotni transformator 220/110/35 kV, nazivnih snaga 75/60/25 MVA. To znači da se između namota 220 i 110 kV može prenijeti 60 MVA (to je snaga transformacije 220/110 kV), između 220 i 35 kV 25 MVA, a između 110 i 35 kV opet 25 MVA. Nazivna snaga namota 220 kV iznosi 75 MVA, a određena je iz analize istodobnosti opterećenja namotâ 110 i 35 kV.

Pri određivanju reaktancija tronamotnog transformatora potrebna su tri pokusa kratkog spoja. To mogu biti oni pokusi koji su prikazani na sl. 2.44. Pri svakom pokusu kratkog spoja na jedan se namot narine trofazni napon, drugi je namot kratko spojen, a treći otvoren. Naravno da se moraju odabrati takvi pokusi kratkog spoja koji se vrše između svih mogućih parova namota. Koji će od dva namota biti kratko spojen ne

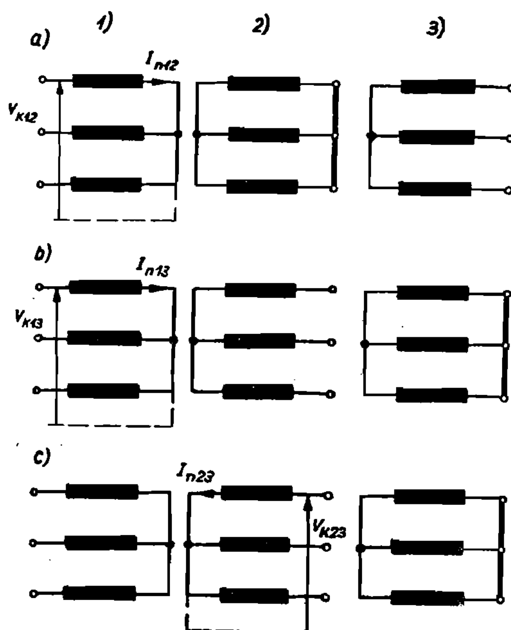
utječe na rezultat. Napon treba povisivati sve dotle dok struja ne postigne onu vrijednost koja odgovara nominalnoj snazi transformacije za koju se vrši pokus kratkog spoja. Sa U_{n1}, U_{n2} i U_{n3} označimo nominalne (linijske) napone triju namota, a sa S_{n12}, S_{n13} i S_{n23} nazivne snage transformacije među namotima, odnosno manje od nazivnih snaga namotâ koji sudjeluju u pokusu kratkog spoja. Za transformator o kojemu su podaci gore navedeni, iznose $S_{n12} = 60$ MVA, $S_{n13} = 25$ MVA, a $S_{n23} = 25$ MVA. Potrebno je poći od namota manje nazivne snage, da prilikom pokusa kratkog spoja ne dođe do preopterećenja jednog od namota.

Iz pokusâ kratkog spoja prikazanih na sl. 2.44. dolazimo do slijedećih reaktancija

$$X_{d12} = \frac{V_{k12}}{I_{n12}} \qquad \text{... (2.141a)}$$

$$X_{d13} = \frac{V_{k13}}{I_{n13}} \qquad \text{... (2.141b)}$$

$$X_{d23} = \frac{V_{k23}}{I_{n23}} \qquad \text{... (2.141c)}$$



Slika 2.44. Shema spoja za tri pokusa kratkog spoja na tronamotnom transformatoru

Relativne napone kratkog spoja — analogno relaciji (2.130) — dobivamo iz izraza

$$u_{k12} = \frac{V_{k12}}{V_{n1}} = \frac{U_{k12}}{U_{n1}} \qquad \text{... (2.142a)}$$

$$u_{k13} = \frac{V_{k13}}{V_{n1}} = \frac{U_{k13}}{U_{n1}} \qquad \text{... (2.142b)}$$

$$u_{k23} = \frac{V_{k23}}{V_{n2}} = \frac{U_{k23}}{U_{n2}} \qquad \text{... (2.142c)}$$

Pri tome treba navesti i podatak za koju prividnu snagu vrijedi relativni napon kratkog spoja. Kao karakteristika transformatora normalno se navode naponi kratkog spoja u procentima, pomoću kojih se određuju reaktancije X_{d12}, X_{d13} i X_{d23}, koristeći relacije analogne relaciji (2.132). Naravno, ako mjesto relativnih napona kratkog spoja uvrstimo napon kratkog spoja u procentima, treba desnu stranu izraza podijeliti sa 100.

U ekvivalentnoj shemi transformator sa tri namota možemo prikazati u direktnom sistemu sa tri reaktancije spojene u zvijezdu (sl. 2.45), koje određujemo iz pokusâ kratkog spoja. Za pokus kratkog spoja između namota (1) i (2) (sl. 2.44a), kad je namot (3) otvoren, možemo postaviti

$$X_{d12} = X_{d1} + X_{d2} \qquad \text{... (2.143a)}$$

Za ostale pokuse kratkog spoja (sl. 2.44) postavljamo analogno

$$X_{d13} = X_{d1} + X_{d3} \qquad \text{... (2.143b)}$$

$$X_{d23} = X_{d2} + X_{d3} \qquad \text{... (2.143c)}$$

Iz jednadžba (2.143) možemo odrediti sve tri reaktancije u ekvivalentnoj shemi (2.45b), pa dobivamo

$$X_{d1} = \frac{1}{2}(X_{d12} + X_{d13} - X_{d23}) \qquad \text{... (2.144a)}$$

$$X_{d2} = \frac{1}{2}(X_{d12} + X_{d23} - X_{d13}) \qquad \text{... (2.144b)}$$

$$X_{d3} = \frac{1}{2}(X_{d13} + X_{d23} - X_{d12}) \qquad \text{... (2.143c)}$$

Događa se međutim da je jedna od reaktancija u ekvivalentnoj shemi negativna, pa s takvom reaktancijom treba provesti račun.

Pretpostavimo da transformator 220/110/35 kV nazivnih snaga 75/60/25 MVA ima ove napone kratkog spoja

$u_{k12} = 10\%$ za 60 MVA

$u_{k13} = 5\%$ za 25 MVA

$u_{k23} = 6\%$ za 25 MVA

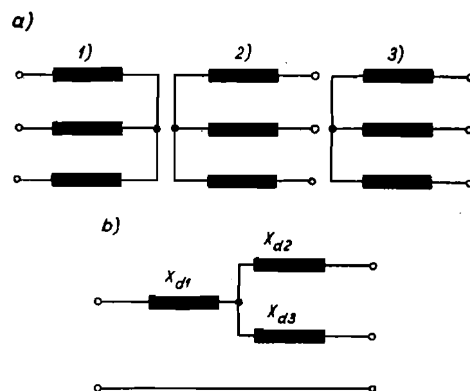
Reaktancije su tada (2.132)

$$X_{d12} = \frac{10}{100} \cdot \frac{220^2}{60} = 80,7\ \Omega$$

$$X_{d13} = \frac{5}{100} \cdot \frac{220^2}{25} = 96,8\ \Omega$$

$$X_{d23} = \frac{6}{100} \cdot \frac{220^2}{25} = 116,2\ \Omega$$

Sve su reaktancije određene za napon 220 kV, dakle za isti napon, jer je samo tako moguće ući s reaktancijama u ekvivalentnu shemu. Prema tome su pojedine reaktancije u ekvivalentnoj shemi (sl. 2.45)



Slika 2.45. Shema spoja tronamotnog transformatora (a) i ekvivalentna shema spoja direktnog sistema (b)

$$X_{d1} = \frac{1}{2}(80,7 + 96,8 - 116,2) = 30,65\ \Omega$$

$$X_{d2} = \frac{1}{2}(80,7 + 116,2 - 96,8) = 50,05\ \Omega$$

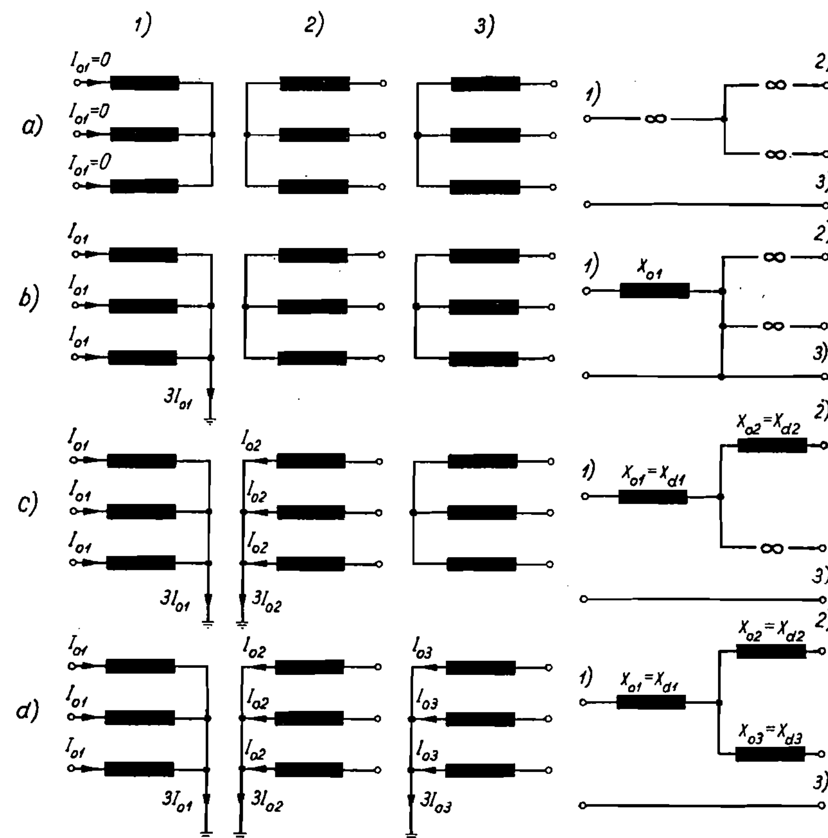
$$X_{d3} = \frac{1}{2}(96,8 + 116,2 - 80,7) = 66,15\ \Omega$$

Inverzne reaktancije jednake su direktnim reaktancijama, jer ćemo doći do istih rezultata ako pokus kratkog spoja izvedemo s inverznim sistemom napona (zamjena dviju faza).

I za tronamotne transformatore direktna i inverzna reaktancija, dobivene na osnovu pokusa kratkog spoja, ne ovise o spoju, izvedbi i o uzemljenju nul-tačke transformatora, dok je nulta reaktancija o tome ovisna.

Promotrimo najprije transformator u spoju zvijezda-zvijezda-zvijezda (sl. 2.46).

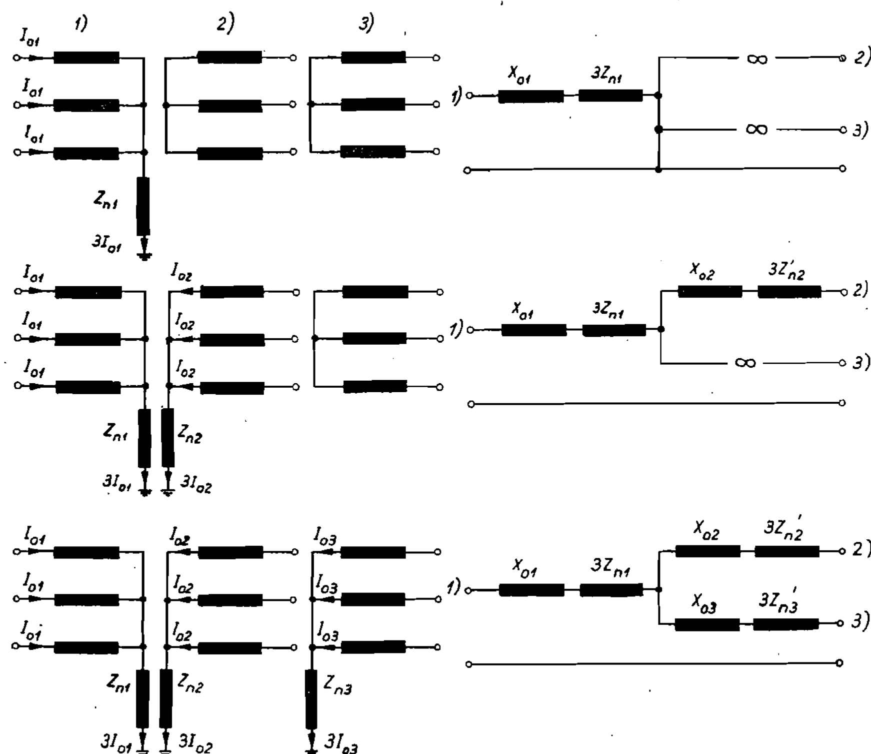
Ako su nul-tačke svih triju namota izolirane, nulta komponenta struje ne može ni teći, pa je za nulti sistem — s koje god strane promatrali — reaktancija neizmjerno velika (sl. 2.46a). U slučaju kad je uzemljena nul-tačka samo jednog namota, nulti sistem struja iz mreže, na koju je priključen uzemljeni namot, može se zatvoriti preko nul-tačke (sl. 2.46b). Magnetski tokovi nultog sistema moraju se zatvoriti kroz zrak (ako postoje samo tri jezgre kao na sl. 2.38a), odnosno kroz nenamotane jezgre (ako takve jezgre postoje, kao na sl. 2.38b i 2.38c). Imamo dakle iste prilike kao u slučaju dvonamotnog transformatora u spoju zvijezda-zvijezda s uzemljenom nul-tačkom jednog namota, pa nulta reaktancija ovisi o izvedbi transformatora.



Slika 2.46. Shema spoja tronamotnog transformatora u spoju zvijezda-zvijezda-zvijezda i njegove ekvivalentne sheme nultog sistema (struje su nacrtane uz predpostavku da su naponi nultog sistema narinuti na stezaljke namota 1)

Ako dva namota imaju uzemljene nul-tačke (sl. 2.46c), imamo s obzirom na ta dva namota iste prilike kao u dvonamotnom transformatoru s uzemljenim namotima (sl. 2.39), jer se pored struja u namotu na koji su narinuti naponi nultog sistema pojavljuju i struje u drugom uzemljenom namotu, koje se mogu zatvoriti preko nul-tačke. Nulta reaktancija jednaka je reaktanciji koja se dobiva iz pokusa kratkog spoja između dva uzemljena namota. Ako su dakle uzemljeni namoti (1) i (2), nulta reaktancija jednaka je $X_{d1} + X_{d2}$, što je vidljivo i iz ekvivalentne sheme na sl. 2.46c. Između namota (3), koji nije uzemljen, i ostalih namota nulta reaktancija neizmjerno je velika, jer se kroz namot ne mogu zatvoriti nulte struje.

U slučaju kad su zvijezdišta svih triju namota uzemljena, ekvivalentna shema za nulti sistem (sl. 2.46d) jednaka je ekvivalentnoj shemi



Slika 2.47. Shema spoja tronamotnog transformatora u spoju zvijezda-zvijezda-zvijezda s uzemljenjem nul-tačke preko impedancije i njegove ekvivalentne sheme nultog sistema (struje su nacrtane uz pretpostavku da su naponi nultog sistema narinuti na stezaljke namota 1)

za direktni sistem, jer se tada zbog nultog toka proizvedenog nultom strujom jednog namota pojavljuju struje koje se mogu zatvoriti i u ostalim namotima, pa imamo s obzirom na međusobne odnose protjecanja iste prilike kao za slučaj trofaznog kratkog spoja.

Uzemljenje nul-tačke transformatora preko impedancije dovodi do analognih ekvivalentnih shema kao i za dvonamotne transformatore. U svakom slučaju treba reaktanciji namota dodati trostruku impedanciju koja se nalazi između zvjezdišta i zemlje (sl. 2.47). Naravno da sve reaktancije i impedancije treba preračunati na isti napon.

S obzirom na uzemljenje nul-tačke transformatora zvijezda-zvijezda-trokut moguća su tri slučaja (sl. 2.48).

U prvom slučaju, kad nijedan namot nije uzemljen, reaktancije su za nulti sistem neizmjerno velike (sl. 2.48a), jer se nulti sistem struja ne može zatvoriti ma na koji namot narinuli napone nultog sistema.

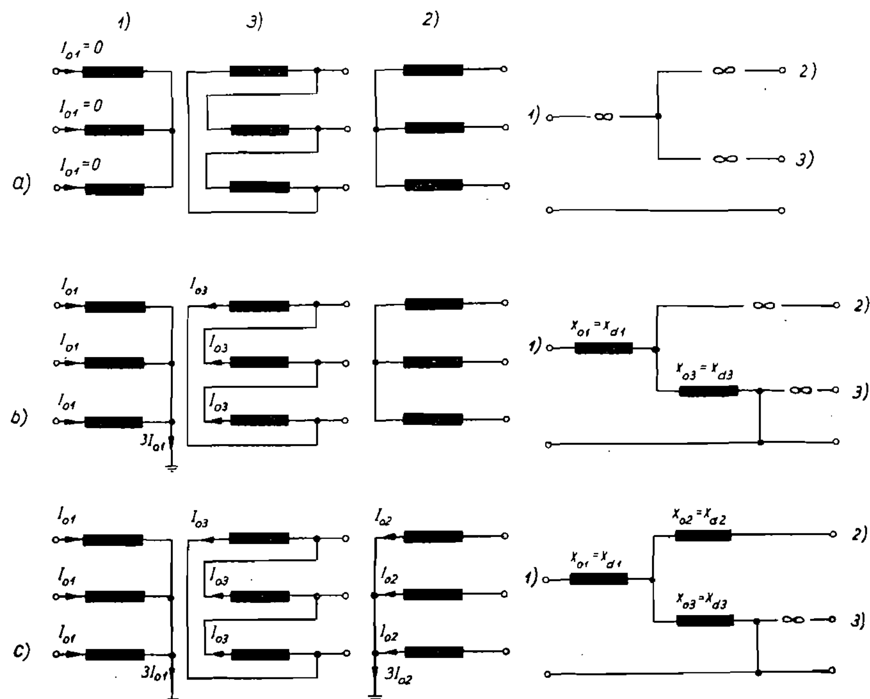
U drugom slučaju, kad je jedan od namota uzemljen — na sl. 2.48b namot (1) — nulti sistem struja može se zatvoriti preko uzemljene nultačke s time, da ćemo imati potpuno iste prilike kao u dvonamotnom transformatoru (spoj zvijezda-trokut sl. 2.43). Nasuprot tome nulti sistem napona narinut na priključnice namota spojenog u trokut i namota spojenog u zvijezdu s neuzemljenim zvjezdištem ne može protjerati struju kroz namote. Nulta reaktancija za napon narinut na stezaljke uzemljenog namota jednaka je reaktanciji kratkog spoja, koja se dobiva iz pokusa kratkog spoja između namota (1) i (3), dakle upravo $X_{d1} + X_{d3}$.

U trećem slučaju — oba su namota spojena u zvijezdu uzemljena (sl. 2.48c) — nulte reaktancije odgovaraju direktnim reaktancijama za slučajeve kad se narine napon na priključnice jednog od namotâ spojenih u zvijezdu. Ako međutim narinemo napone nultog sistema na priključnice namota spojenog u trokut, neće poteći struje nultog sistema, jer se ne mogu zatvoriti.

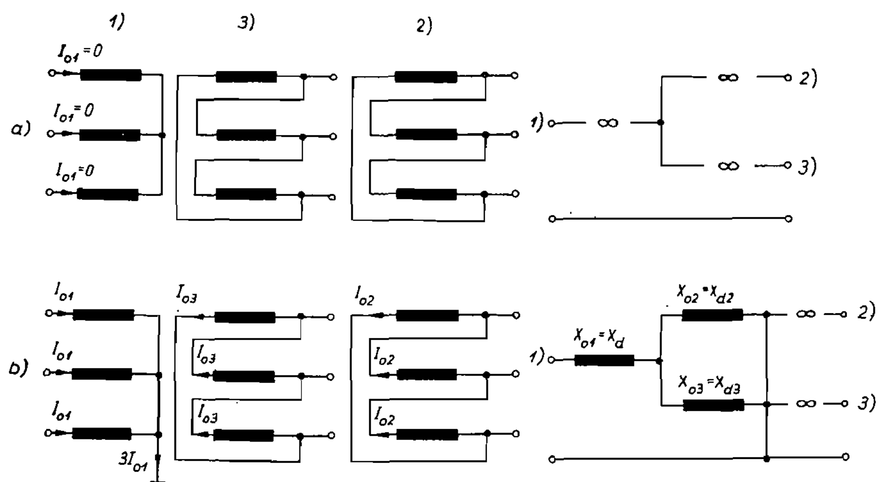
Postojanje impedancije između zvjezdišta i zemlje dovest će do dodatka trostruke impedancije u ekvivalentne sheme, analogno onome na sl. 2.47.

Transformator u spoju zvijezda-trokut-trokut može imati nul-tačku namota spojenog u zvijezdu izoliranu (sl. 2.49a) ili uzemljenu (sl. 2.49b). U prvom slučaju sve su nulte reaktancije neizmjerno velike. U drugom slučaju pojava struja nultog sistema u namotu spojenom u zvijezdu traži struje u oba namota spojena u trokut, pa se transformator vlada kao da su namoti spojeni u trokut međusobno paralelno spojeni. Naponi nultog sistema narinuti na priključnice namota spojenih u trokut neće moći protjerati struju. Radi toga su nulte reaktancije neizmjerno velike, promatrano sa strane namota spojenih u trokut.

Konačno, da kompletiramo pregled tronamotnih transformatora, spomenimo da transformator u spoju trokut-trokut-trokut ima, promatrano sa strane bilo kojeg namota, neizmjerno veliku nultu reaktanciju.



Slika 2.48. Shema spoja tronamotnog transformatora u spoju zvijezda-zvijezda-trokut i njegove ekvivalentne sheme nultog sistema (struje su nacrtane uz pretpostavku da su naponi nultog sistema narinuti na stezaljke namota 1).

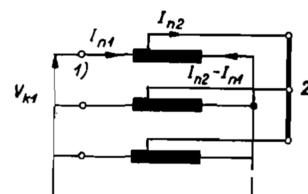


Slika 2.49. Shema spoja tronamotnog transformatora u spoju zvijezda-trokut-trokut i njegove ekvivalentne sheme nultog sistema (struje su nacrtane uz pretpostavku da su naponi nultog sistema narinuti na stezaljke namota 1).

Transformatori u štednom spoju

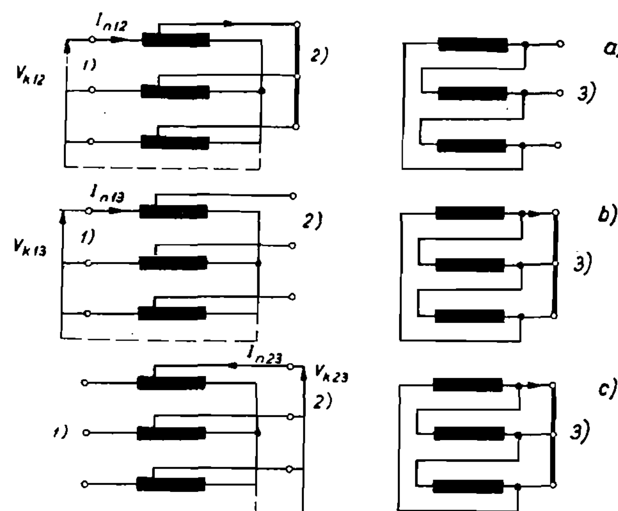
Kao za transformatore s odvojenim namotima, i za transformator u štednom spoju direktna reaktancija određuje se iz pokusa kratkog spoja. Trofazni transformator u štednom spoju spojen je u zvijezdu, a često se izvodi s tercijarnim namotom spojenim u trokut.

Promotrimo najprije transformator u štednom spoju bez tercijarnog namota. Pokus kratkog spoja izvodi se prema shemi na sl. 2.50, dakle analogno pokusu kratkog spoja dvonamotnog transformatora. Iz napona V_{k1} narinutog na priključnice (1) i struje I_{n1}, koju će taj napon protjerati, određuje se reaktancija kratkog spoja, koja je ujedno direktna reaktancija prema relaciji (2.129).



Slika 2.50. Pokus kratkog spoja transformatora u štednom spoju; trofazni napon narinut na stezaljke (1), stezaljke (2) kratkospojene

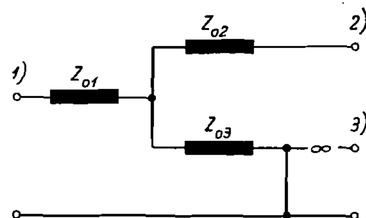
Za određivanje reaktancije kratkog spoja štednog transformatora s tercijarnim namotom potrebna su — kao i za tronamotni transformator — tri pokusa kratkog spoja (sl. 2.51). Iz tih pokusa dolazimo do reaktancija — iz relacije (2.141) — za dva po dva namota, pomoću kojih određujemo tri reaktancije spojene u zvijezdu prema relacijama (2.144).



Slika 2.51. Tri pokusa kratkog spoja štednog transformatora sa tercijarnim namotom spojenim u trokut

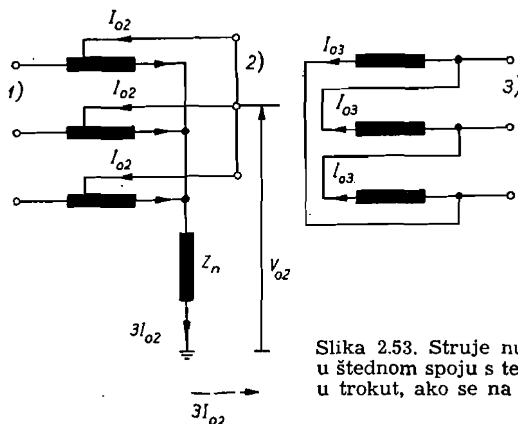
Prema tome, u pogledu direktne i inverzne reaktancije transformator u štednom spoju bez tercijarnog namota analogan je dvonamotnom, a transformator u štednom spoju s tercijarnim namotom tronamotnom transformatoru.

Ekvivalentnu shemu nultog sistema za transformator u štednom spoju s uzemljenom nul-tačkom i s tercijarnim namotom možemo prikazati — analogno shemi tronamotnog transformatora u spoju zvijezda-zvijezda-trokut (sl. 2.48c) — trima impedancijama spojenim u zvijezdu (sl. 2.52). U tako prikazanoj ekvivalentnoj shemi dolaze impedancije Z_{01}, Z_{02} i Z_{03}, koje treba još odrediti. Ako na priključnice (2) narinemo napon nultog sistema (sl. 2.53), struje će se kroz zavoje koji odgovaraju tim priključnicama i impedanciju Z_n moći zatvoriti, uz istodobnu pojavu struja u namotu spojenom u trokut. S obzirom na protjecanja imat ćemo istu situaciju kao pri pokusu kratkog spoja između namota (2) i (3), pa će se — u slučaju da je impedancija Z_n premoštena — transformator vladati kao da ima reaktanciju kratkog spoja X_{23} dobivenu iz pokusa na sl. 2.51c. Postojanje impedancije Z_n u zvjezdištu transformatora kroz koju teče trostruka struja I_{02}, tražit će u ekvivalentnoj shemi impedanciju $3\,Z_n$,



Slika 2.52. Ekvivalentna shema transformatora u štednom spoju s uzemljenom nul-tačkom i tercijarnim namotom spojenim u trokut

da bismo u ekvivalentnoj shemi imali iste padove napona kakve imamo u stvarnosti. Prema tome nultu impedanciju, uzevši u obzir namote (2) i (3), dakle zbroj impedancija Z_{02} i Z_{03} na shemi sl. 2.52, možemo prikazati izrazom

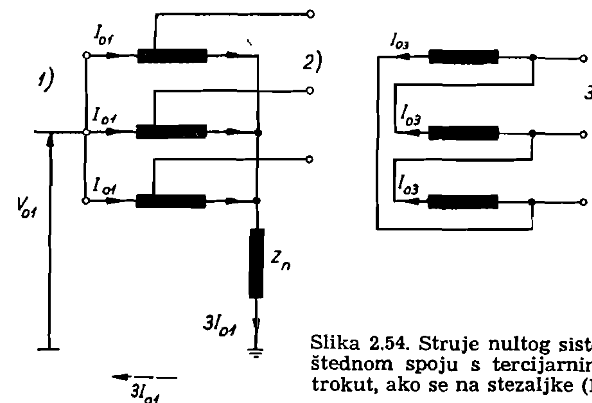


Slika 2.53. Struje nultog sistema transformatora u štednom spoju s tercijarnim namotom spojenim u trokut, ako se na stezaljke (2) narine istofazni napon

$$Z_{02} + Z_{03} = X_{d23} + 3\,Z_n \qquad \ldots (2.145a)$$

Sve reaktancije u (2.145a) preračunate su na napon namota (2).

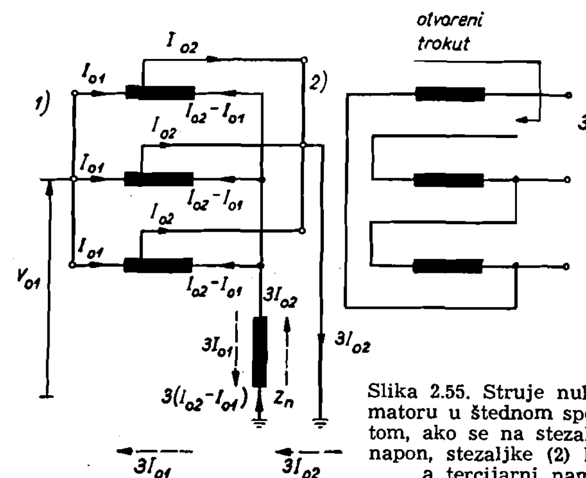
Ako na priključnice namota (1) narinemo napon nultog sistema (sl. 2.54), kroz impedanciju Z_n poteći će struja $3\,I_{01}$. S obzirom na odnose



Slika 2.54. Struje nultog sistema u transformatoru u štednom spoju s tercijarnim namotom spojenim u trokut, ako se na stezaljke (1) narine istofazni napon

protjecanja imat ćemo sada prilike analogne pokusu kratkog spoja na sl. 2.51b. Budući da kroz Z_n protječe struja I_{01}, koja odgovara naponu primarnog namota, treba Z_n preračunati na napon priključnica (2), jer se sve impedancije promatraju s obzirom na taj napon. Prema tome impedanciju koja odgovara sumi $Z_{01} + Z_{03}$ možemo odrediti iz relacije

$$Z_{01} + Z_{03} = X_{d13} + 3\,Z_n \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \qquad \ldots (2.145b)$$



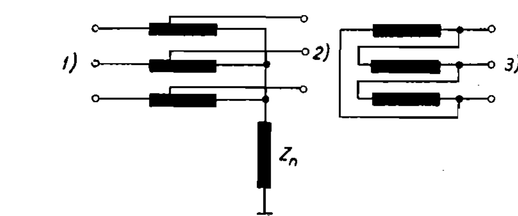
Slika 2.55. Struje nultog sistema u transformatoru u štednom spoju s tercijarnim namotom, ako se na stezaljke (1) narine istofazni napon, stezaljke (2) kratko spoje i uzemlje, a tercijarni namot ostane otvoren

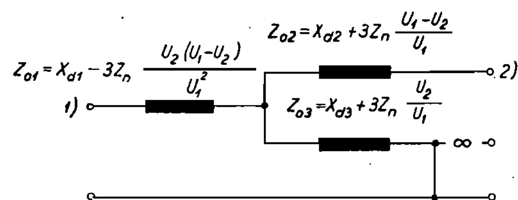
Kad narinemo napon na stezaljke (1) s uzemljenim stezaljkama (2) i s otvorenim trokutom ili bez namota spojenog u trokut (sl. 2.55), imat ćemo s obzirom na protjecanja iste prilike kao pri pokusu kratkog spoja na sl. 2.51a, dok će kroz impedanciju Z_n teći razlika struja $3\,(I_{o2} - I_{o1})$. Ta razlika nastaje od struja $3\,I_{o2}$ i $3\,I_{o1}$, koje teku u različitim smjerovima. Da odredimo reaktanciju Z_n preračunatu na napon stezaljki (2), treba Z_n pomnožiti s izrazom

$$3\left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

gdje je prvi član omjer $U_2/U_2 = 1$ za preračunavanje na napon stezaljke (2), a drugi član za preračunavanje na napon stezaljke (1). Prema tome zbroj reaktancija $Z_{o1} + Z_{o2}$ (sl. 2.52) možemo prikazati relacijom

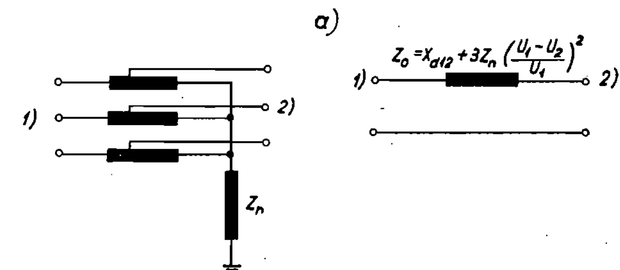
$$Z_{o1} + Z_{o2} = X_{d12} + 3\,Z_n \left(\frac{U_1 - U_2}{U_1}\right)^2 \qquad \ldots (2.145c)$$

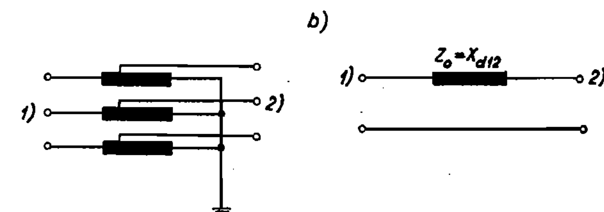




b)

Slika 2.56. Shema spoja i ekvivalentne sheme nultog sistema štednog transformatora s tercijarnim namotom spojenim u trokut: (a) s uzemljenom nul-tačkom preko impedancije i (b) s neposredno uzemljenom nul-tačkom





Slika 2.57. Shema spoja i ekvivalentne sheme nultog sistema štednog transformatora bez tercijarnog namota: (a) s uzemljenom nul-tačkom preko impedancije i (b) s neposrednom uzemljenom nul-tačkom

Iz tri relacije (2.145) određujemo tri impedancije u ekvivalentnoj shemi kao na sl. 2.52, koje iznose

$$Z_{o1} = \frac{1}{2}\,(X_{d12} + X_{d13} - X_{d23}) - 3\,Z_n \frac{U_2\,(U_1 - U_2)}{U_1^2} \qquad \ldots (2.146a)$$

$$Z_{o2} = \frac{1}{2}\,(X_{d12} + X_{d23} - X_{d13}) + 3\,Z_n \frac{U_1 - U_2}{U_1} \qquad \ldots (2.146b)$$

$$Z_{o3} = \frac{1}{2}\,(X_{d13} + X_{d23} - X_{d12}) + 3\,Z_n \frac{U_2}{U_1} \qquad \ldots (2.146c)$$

Ili, ako upotrijebimo oznake iz relacije (2.144),

$$Z_{o1} = X_{d1} - 3\,Z_n \frac{U_2\,(U_1 - U_2)}{U_1^2} \qquad \ldots (2.147a)$$

$$Z_{o2} = X_{d2} + 3\,Z_n \frac{U_1 - U_2}{U_1} \qquad \ldots (2.147b)$$

$$Z_{o3} = X_{d3} + 3\,Z_n \frac{U_2}{U_1} \qquad \ldots (2.147c)$$

Na sl. 2.56a prikazana je ekvivalentna shema štednog transformatora s tercijarnim namotom spojenim u trokut, s uzemljenom nul-tačkom preko impedancije Z_n. U shemu su unesene impedancije prema relacijama (2.147). Do nultih reaktancija za isti transformator s neposredno uzemljenom nul-tačkom dolazimo kad u relacije (2.147) uvrstimo $Z_n = 0$. Ekvivalentna shema prikazana je na sl. 2.56b.

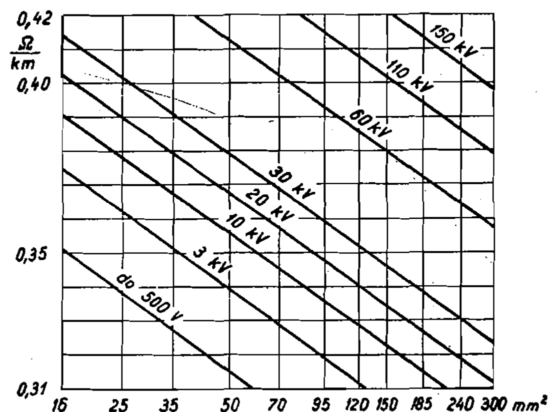
Kad ne postoji tercijarni namot spojen u trokut, nulta reaktancija određena je relacijom (2.145c). Ekvivalentna shema prikazana je na sl. 2.57a za slučaj kad je nul-tačka uzemljena preko impedancije Z_n. Ako je nul-tačka neposredno uzemljena, dakle kad je $Z_n = 0$, dolazimo do ekvivalentne sheme prikazane na sl. 2.57b.

2.5. REAKTANCIJE VODOVA I KABELA

Direktna reaktancija zračnog voda jednaka je reaktanciji faze. Budući da nema razlike teku li kroz vod struje direktnog ili inverznog sistema, inverzna reaktancija jednaka je direktnoj.

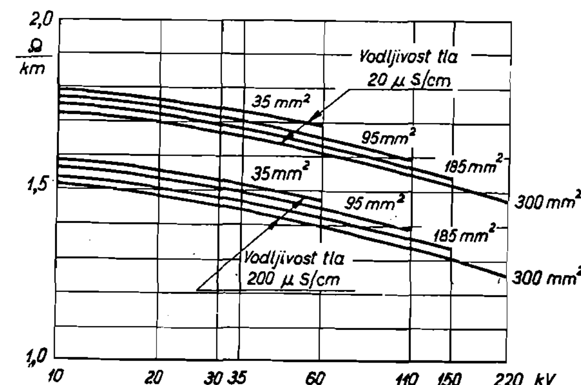
Reaktancija faze ovisna je o geometrijskom rasporedu vodiča i o promjeru samog vodiča, pa ju je moguće odrediti poznavajući sliku glave stupa i presjek (odnosno promjer) vodiča. Ovdje se nećemo baviti tačnim određivanjem reaktancija, jer je za određivanje struja kratkog spoja dovoljno računati s približnim vrijednostima reaktancija. Pri tačnom izračunavanju reaktancija može se upotrijebiti npr. Lit. 17. i 18.

Iz dijagrama na sl. 2.58. mogu se očitati direktne i inverzne reaktancije zračnih vodova u ovisnosti o presjeku i nazivnom naponu. Za vodove nazivnog napona iznad 30 kV možemo računati s približnom direktnom reaktancijom od 0,4 Ω/km, dok za vodove nazivnog napona 30 kV i nižeg možemo približno računati s reaktancijom od 0,35 Ω/km. Dijagram na



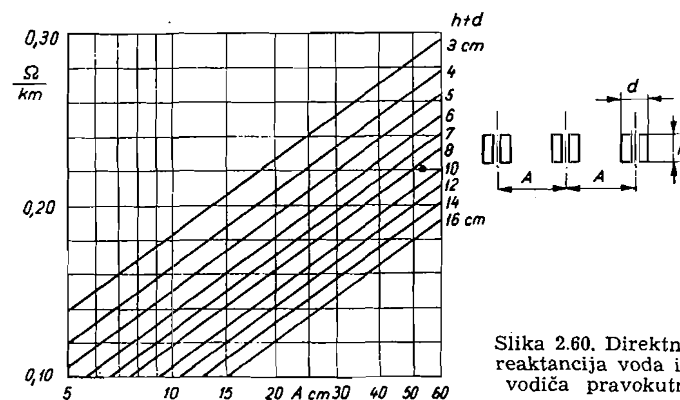
Slika 2.58. Direktna i inverzna reaktancija zračnih vodova

sl. 2.59. prikazuje ovisnost nulte reaktancije zračnog voda bez zaštitnog užeta o nazivnom naponu i presjeku vodiča. U dijagramu su ucrtane dvije grupe krivulja: gornja za kamenito tlo (vodljivost tla 20 μS/cm) i donja za vlažno tlo (vodljivost tla 200 μS/cm). Podaci iz sl. 2.59. mogu se u prvoj aproksimaciji upotrijebiti i za zračne vodove sa zaštitnim užetom.



Slika 2.59. Nulta reaktancija zračnog voda bez zaštitnog užeta

Nulti djelatni otpor po fazi jednak je djelatnom otporu vodiča povećanom za oko 0,15 Ω/km, zbog otpora tla.



Slika 2.60. Direktna i inverzna reaktancija voda izvedenog od vodiča pravokutnog profila

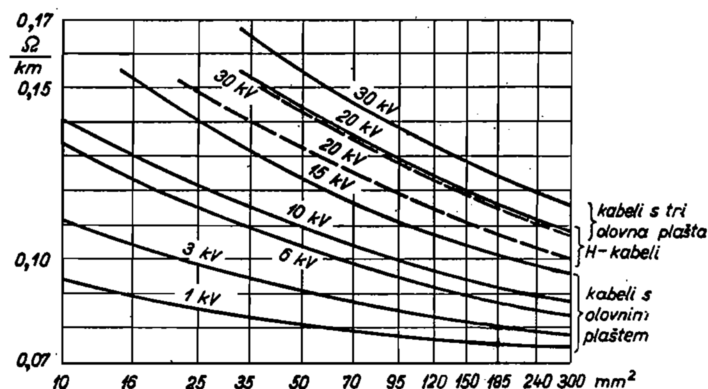
U nekim slučajevima potrebno je poznavati reaktanciju spojeva među pojedinim dijelovima rasklopnog postrojenja ili elektrane, izvedenih profilnim golim vodičima. Približno se može računati s reaktancijom od 0,15 Ω/km. Tačniji podaci o reaktanciji za pravokutne profile mogu se naći u dijagramu na sl. 2.60.

Direktna i inverzna reaktancija kabela za napone do 30 kV može se odrediti iz dijagrama na sl. 2.61, a za uljne kabele iz dijagrama na sl. 2.62. Podaci o nultim impedancijama nekih kabela navedeni su u tab. 2.4.

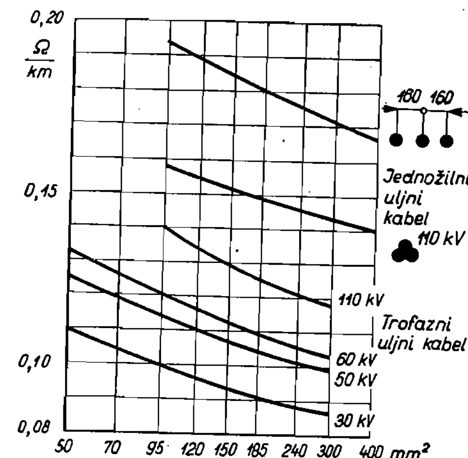
TABLICA 2.4.

Nulte impedancije nekih izvedaba kabela

	Presjek mm²	Nulta impendancija Ω/km
Trožilni kabel s olovnim plaštom 10 kV	35	1,27 + j 1,76
	70	1,15 + j 1,52
	150	1,13 + j 1,12
Trožilni kabel sa tri olovna plašta 30 kV	50	1,33 + j 0,92
	95	1,12 + j 0,74
	150	0,93 + j 0,62
Jednožilni uljni kabel 110 kV	120	0,79 + j 0,30
	185	0,69 + j 0,27
	300	0,60 + j 0,24



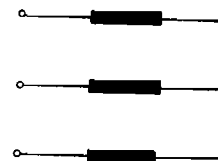
Slika 2.61. Direktna i inverzna reaktancija trofaznih kabela za 1 do 30 kV. (Za kabele bez čelične trake vrijednosti reaktancije su za 10% manje)



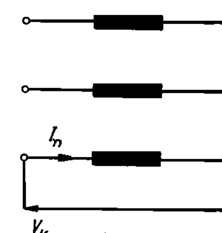
Slika 2.62. Direktna i inverzna reaktancija uljnih kabela

2.6. PRIGUŠNICE

Prigušnice, o kojima je ovdje riječ, služe za smanjenje struja kratkog spoja, a spajaju se u seriju s potrošačima. Izvode se kao svici bez željeza, a slog prigušnica sastoji se od tri prigušnice (za svaku fazu po jedna), koje međusobno nisu spojene (sl. 2.63).



Slika 2.63. Shema spoja prigušnice



Slika 2.64. Pokus kratkog spoja prigušnice

Prigušnica je karakterizirana: nazivnim naponom U_n (linijski nazivni napon mreže), prolaznom nazivnom snagom S_n i reaktancijom u postocima x%. Iz nazivnog napona i nazivne snage određujemo nazivnu struju prigušnice

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}\, U_n} \qquad \dots (2.148)$$

Reaktanciju kratkog spoja (X_k) određujemo analogno kao kod transformatora pokusom kratkog spoja (sl. 2.64). Iz podataka pokusa kratkog spoja određujemo

$$X_k = \frac{V_k}{I_n} \qquad \dots (2.149)$$

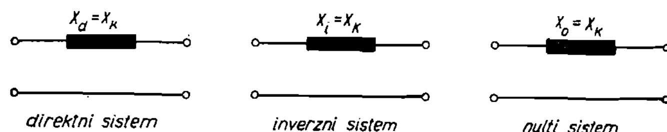
dok je procentualna reaktancija

$$x\,\% = \frac{X_k I_n}{V_n} 100 = X_k \frac{S_n}{U_n^2} 100 \qquad \ldots (2.150)$$

Poznavajući dakle nazivni napon, nazivnu snagu i procentualnu reaktanciju, reaktanciju prigušnice određujemo — kao i za transformator — iz relacije

$$X_k = \frac{x\,\%}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \qquad \ldots (2.151)$$

Za prigušnicu — kao i za transformator — direktna reaktancija jednaka je reaktanciji kratkog spoja (X_k). Inverzna reaktancija jednaka je



Slika 2.65. Ekvivalentne sheme prigušnice

direktnoj reaktanciji, jer nema dijelova koji rotiraju. Također je nulta reaktancija jednaka direktnoj reaktanciji, jer nema zapreke da se nulte komponente struje zatvore kroz prigušnicu. Prema tome za prigušnicu vrijede ekvivalentne sheme prikazane na sl. 2.65.

2.7. POTROŠAČI

Potrošače, s obzirom na određivanje struje kratkog spoja, možemo podijeliti na pasivne i aktivne. U pasivne potrošače ubrajamo žarulje, sva otporna trošila, elektrolize i sl., dok u aktivne sinhrone i asinhrone motore.

Sinhroni motori (kao i sinhroni kompenzatori) vladaju se u slučaju kratkog spoja kao sinhroni generatori, pa njihovo postojanje u mreži dovodi do povećanja struje kratkog spoja. Sve sinhrone strojeve treba prilikom određivanja struja kratkog spoja tretirati kao sinhrone generatore.

Asinhroni motori međutim nemaju uzbudu neovisnu o mreži, kao sinhroni motori, pa njihov udio u struji kratkog spoja traje samo 1 do 2 periode. Radi toga ćemo pri određivanju struja kratkog spoja računati da asinhroni motori imaju samo početnu direktnu reaktanciju, koja iznosi 25 do 30% preračunato na nazivni napon i na prividnu snagu, koju motor uzima u punom opterećenju. Inverzna reaktancija približno je jednaka direktnoj reaktanciji. Nulta reaktancija — kao i u sinhronih strojeva — znatno je manja od direktne, a ima značenje samo onda ako je nul-tačka asinhronog motora uzemljena, što se međutim u praksi nikada ne pojavljuje. Jednu do dvije periode nakon nastanka kratkog

spoja prestaje udio asinhronih motora u struji kratkog spoja, pa se tada može asinhroni motor smatrati pasivnim potrošačem.

Prilikom određivanja struja kratkog spoja obično ne uzimamo u račun pasivne potrošače, jer račun provodimo uz pretpostavku da se mreža nalazi u praznom hodu. Radi toga ih izostavljamo u ekvivalentnim shemama. No ako pak želimo uzeti u obzir i pasivne potrošače — dakle poći od opterećene mreže — impedanciju pasivnog potrošača možemo odrediti iz djelatne snage (P), jalove snage (Q) i faktora snage ($\cos\varphi$). Impedancija pasivnog potrošača jest

$$Z = \frac{U^2}{P} \cos^2\varphi + j \frac{U^2}{Q} \sin^2\varphi \qquad \ldots (2.152)$$

pa je djelatni otpor

$$R = \frac{U^2}{P} \cos^2\varphi \qquad \ldots (2.153a)$$

a reaktancija

$$X = \frac{U^2}{Q} \sin^2\varphi \qquad \ldots (2.153b)$$

2.8. EKVIVALENTNE SHEME TROFAZNE MREŽE

A. Reaktancije u ekvivalentnoj shemi

U ekvivalentnu shemu možemo unijeti apsolutne vrijednosti (Ω) reaktancija. Pri tome međutim treba znati, da su u ekvivalentnim shemama transformatori zamijenjeni reaktancijama, pa je samim tim pretpostavljeno da je prijenosni odnos transformacije 1 : 1. Da bi se, međutim, održali isti onakvi odnosi u mreži kakvi postoje u stvarnosti, potrebno je sve reaktancije (odnosno impedancije, ako se uzmu u obzir i djelatni otpori) preračunati na isti napon. Preračunava se — kako je već bilo spomenuto — prema formuli

$$X' = X \left(\frac{U'}{U}\right)^2 \qquad \ldots (2.154)$$

gdje je U napon koji vlada na mjestu reaktancije X, koja je zadana u omima, a U' napon na koji želimo preračunati reaktanciju X. Napon U' može biti bilo kakav, bez obzira na nazivne napone u mreži, a bitno je da napon U' bude jednak za sve dijelove mreže. Iz praktičkih razloga, međutim, najpovoljnije je kao napon na koji će se preračunati sve reaktancije u mreži odabrati onaj, koji se najčešće javlja u promatranoj mreži, jer ćemo na taj način najmanje preračunavati.

Osnova za određivanje reaktancija transformatora, generatora i ostalih dijelova mreže normalno je procentualna reaktancija, uz koju je potrebno da bude navedena snaga na koju se odnosi ta procentualna reaktancija. U nekim slučajevima podatak o snazi nije potrebno posebno navoditi (generator, dvonamotni transformator), jer se samo po sebi razumije da

se radi o nazivnoj snazi. Podatak o snazi međutim potreban je npr. za tronamotni transformator, jer tada nazivne snage namotâ mogu biti različite.

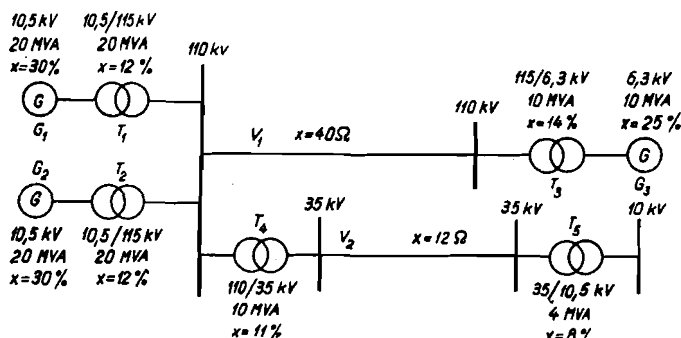
Određivanje reaktancije s obzirom na napon U', na koji želimo preračunati cijelu promatranu mrežu, najjednostavnije je pomoću izraza

$$X' = \frac{x^0/_0}{100} \frac{U'^2}{S_n} \qquad \ldots (2.155)$$

gdje je $x^0/_0$ procentualna reaktancija, a S_n nazivna prividna snaga, odnosno snaga za koju vrijedi procentualna reaktancija. Reaktanciju X' dobit ćemo u omima, ako U' uvrstimo u kV, a S_n u MVA. Reaktanciju s obzirom na nazivni napon određujemo iz relacije

$$X = \frac{x^0/_0}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \qquad \ldots (2.156)$$

pa ako želimo reaktanciju X preračunati na napon U' moramo je množiti sa $(U'/U_n)^2$, što daje relaciju (2.155).



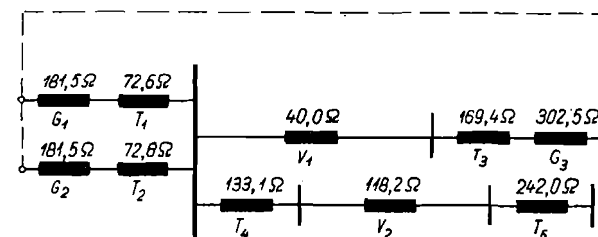
Slika 2.66. Primjer mreže za određivanje reaktancija

Na sl. 2.66 prikazana je jednopolna shema mreže s označenim karakteristikama generatora, transformatora, te reaktancijama vodova. Na sl. 2.67 tabelarno je prikazan računski postupak određivanja reaktancija preračunatih na napon 110 kV. Reaktancije generatora i transformatora određene su prema (2.155), a vodova prema (2.154). Na sl. 2.67 prikazana je i ekvivalentna shema mreže s označenim reaktancijama. Nul-tačke generatora međusobno su spojene, što je moguće učiniti, jer nul-tačke imaju isti potencijal.

Mjesto s apsolutnim vrijednostima reaktancija u omima (odnosno s apsolutnim vrijednostima impedancija, ako se ne zanemare djelatni otpori), pogodno je računati s relativnim vrijednostima. Uobičajeno je da se te relativne vrijednosti nazivaju jediničnim (per-unit) vrijednostima, jer su određene u odnosu na odabrane osnovne veličine, koje služe kao jedinice mjere. Napon, struja, snaga i impedancija (odnosno reaktancija) četiri su veličine koje se pojavljuju prilikom proračuna mreže. Jedinične vrijednosti tih veličina definirane su relacijama

$$u = \frac{U}{U_{osn}} \; ; \; i = \frac{I}{I_{osn}} \; ; \; s = \frac{S}{S_{osn}} \; ; \; z = \frac{Z}{Z_{osn}} \qquad \ldots (2.157)$$

gdje su U_{osn}, I_{osn}, S_{osn}, Z_{osn} osnovne vrijednosti linijskog napona, struje, prividne snage i impedancije. Među osnovnim vrijednostima moraju vrijediti sve relacije koje vrijede za te veličine s pravim vrijednostima. Prema tome mora biti



	S_n	X	$110^2/S_n$	$(110/U_n)^2$	X Ω
G_1, G_2	20	30%	605	—	181,5
T_1, T_2	20	12%	605	—	72,6
V_1	—	40Ω	—	1,00	40,0
G_3	10	25%	1210	—	302,5
T_3	10	14%	1210	—	169,4
T_4	10	11%	1210	—	133,1
V_2	—	12Ω	—	9,85	118,2
T_5	4	8%	3025	—	242,0

Slika 2.67. Ekvivalentna shema mreže prikazane na sl. 2.66 Sve reaktancije preračunate na napon 110 kV (oznaka j radi pojednostavnjenja ispuštena je)

$$U_{osn} = \sqrt{3}\, I_{osn} Z_{osn} \qquad \ldots (2.158a)$$

$$S_{osn} = \sqrt{3}\, U_{osn} I_{osn} \qquad \ldots (2.158b)$$

Nije, dakle, moguć slobodan izbor svih osnovnih vrijednosti, jer će izborom dviju veličina biti određene ostale dvije. Obično se slobodno odabire osnovni napon u kV i osnovna snaga u MVA. Time su određene vrijednosti osnovne struje i osnovne impedancije iz relacija

$$I_{osn} = \frac{S_{osn}}{\sqrt{3}\, U_{osn}} \qquad \ldots (2.159a)$$

$$Z_{osn} = \frac{U_{osn}}{\sqrt{3}\, I_{osn}} = \frac{U^2_{osn}}{S_{osn}} \qquad \ldots (2.159b)$$

Osnovnu vrijednost struje dobivamo u kA, a osnovnu vrijednost reaktancije u Ω.

Računanje s jediničnim vrijednostima provodi se po istim pravilima kao i računanje sa stvarnim vrijednostima. Izraze (2.158) pomoću stvarnih vrijednosti možemo napisati

$$U = \sqrt{3}\, I\, Z \qquad \ldots (2.160a)$$

$$S = \sqrt{3}\, U\, I \qquad \ldots (2.160b)$$

Ako relacije (2.160) podijelimo sa (2.158), te uzmemo u obzir odnose (2.157), dobivamo

$$u = i\, z \qquad \ldots (2.161a)$$

$$s = u\, i \qquad \ldots (2.161b)$$

Dobivamo dakle relacije kao da se radi o jednofaznom sistemu, a baš tako je u ekvivalentnim shemama prikazan simetrični trofazni sistem. Takve relacije međutim daju rezultate koji vrijede za trofazni sistem.

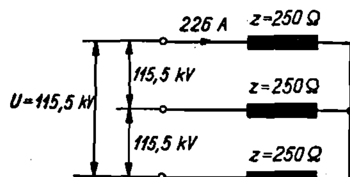
Neka smo npr. odabrali kao osnovne vrijednosti $S_{osn} = 30$ MVA i $U_{osn} = 110$ kV. Prema (2.159) ostale su osnovne vrijednosti

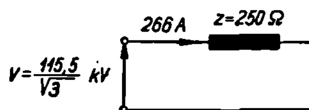
$$I_{osn} = \frac{30}{110\sqrt{3}} = 0{,}157 \text{ kA}$$

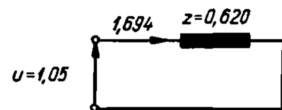
$$Z_{osn} = \frac{110^2}{30} = 403\ \Omega$$

Dalje pretpostavimo da je u trofaznom sistemu na napon $U = 115{,}5$ kV priključena impedancija $Z = 250\ \Omega$ (sl. 2.68). Struja je (2.160a)

$$I = \frac{115{,}5}{250\sqrt{3}} = 0{,}266 \text{ kA}$$







Slika 2.68. Određivanje jediničnih vrijednosti $U_{osn} = 110$ kV. $S_{osn} = 30$ MVA

dok je snaga

$$S = \sqrt{3} \cdot 115{,}5 \cdot 0{,}266 = 53{,}4 \text{ MVA}$$

Računajući s jediničnim vrijednostima, jedinični napon i jedinična impedancija iznose

$$u = \frac{115{,}5}{110} = 1{,}05$$

$$z = \frac{250}{403} = 0{,}620$$

pa su struja i snaga prema (2.161)

$$i = \frac{u}{z} = \frac{1{,}05}{0{,}620} = 1{,}694$$

$$s = u\, i = 1{,}05 \cdot 1{,}694 = 1{,}779$$

Množenjem sa I_{osn} i S_{osn} dobivamo 0,266 kA i 53,4 MVA.

Osnovne vrijednosti povoljno je tako odabrati da se jedinične vrijednosti ne razlikuju mnogo od jedinice. Za cijelu mrežu vrijedi ista osnovna vrijednost za snagu, dok se osnovna vrijednost napona mijenja kao i prijenosni odnos transformacije prilikom prijelaza iz jednog u drugi dio mreže, koje su međusobno spojene transformatorima. Pri određivanju osnovnog napona treba poći od po volji odabranog dijela mreže i određivati osnovne napone prema prijenosnom omjeru transformatora. Za transformator dobivamo istu jediničnu reaktanciju, bez obzira da li polazimo od višeg ili nižeg napona. Ako sa Z_1 označimo reaktanciju transformatora preračunatu na napon U_1, a sa Z_2 reaktanciju preračunatu na napon U_2, među njima postoji odnos

$$Z_1 = Z_2 \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \qquad \ldots (2.162)$$

gdje je U_1/U_2 prijenosni omjer transformacije. Neka je S_{osn} osnovna snaga, a $U_1 = U_{osn1}$, pa je jedinična reaktancija određena prema naponu U_{osn1}

$$z_1 = \frac{Z_1}{Z_{osn1}} = \frac{Z_1\, S_{osn}}{U^2_{osn1}} \qquad \ldots (2.163)$$

Jedinična reaktancija, određena prema naponu U_{osn2}, koji je

$$U_{osn2} = U_{osn1} \frac{U_2}{U_1} \qquad \ldots (2.164)$$

iznosi

$$z_2 = \frac{Z_2}{Z_{osn2}} = \frac{Z_2\, S_{osn}}{U^2_{osn2}} \qquad \ldots (2.165)$$

Kad uzmemo u obzir relacije (2.162) i (2.164), dobivamo konačno

$$z_2 = \frac{Z_2\, S_{osn}}{U^2_{osn1}} \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 = \frac{Z_1\, S_{osn}}{U^2_{osn1}} = z_1 \qquad \ldots (2.166)$$

Za generatore, transformatore i ostale dijelove mreže, za koje je reaktancija zadana u procentima ($x^0/_0$), jedinična je vrijednost

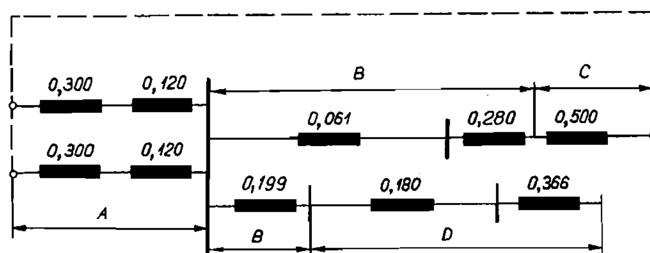
$$x = \frac{x^0/_0}{100} \qquad \ldots (2.167)$$

To međutim vrijedi samo u slučaju ako su osnovna snaga i osnovni napon za određivanje jediničnih vrijednosti jednaki nazivnoj snazi i nazivnom naponu generatora, odnosno transformatora, za koje vrijedi $x^0/_0$. Kad taj uvjet nije ispunjen, treba odrediti novu jediničnu reaktanciju x' prema osnovnim vrijednostima koje vrijede za dio mreže u kojem se nalazi promatrani generator ili transformator. Jedinična reaktancija x' određuje se i pomoću jedinične reaktancije (2.167) iz relacije

$$x' = x \frac{U^2_n}{U^2_{osn}} \frac{S_{osn}}{S_n} \qquad \ldots (2.168)$$

jer je — prema (2.156)

$$X = x \frac{U^2_n}{S_n} \qquad \ldots (2.169)$$



		U_n kV	S_n MVA	x	X Ω	S_{osn} MVA	U_{osn} kV	Z_{osn} Ω	$\left(\frac{U_n}{U_{osn}}\right)^2$	$\frac{S_{osn}}{S_n}$	$\left(\frac{U_n}{U_{osn}}\right)^2 \frac{S_{osn}}{S_n}$	x
A	G_1, G_2	10,5	20	0,30	—	20	10,5	—	1,000	1,000	1,000	0,300
	T_1, T_2	10,5	20	0,12	—	20	10,5	—	1,000	1,000	1,000	0,120
B	V_1	110	—	—	40	20	115	661	—	—	—	0,061
	T_3	115	10	0,14	—	20	115	—	1,000	2,000	2,000	0,280
	T_4	110	10	0,11	—	20	115	—	0,906	2,000	1,812	0,199
C	G_3	6,3	10	0,25	—	20	6,3	—	1,000	2,000	2,00	0,500
D	V_2	35	—	—	12	20	36,6	67,0	—	—	—	0,180
	T_5	35	4	0,08	—	20	36,6	—	0,914	5,000	4,570	0,366

Slika 2.69. Primjer određivanja jediničnih vrijednosti reaktancija i ekvivalentna shema s jediničnim reaktancijama

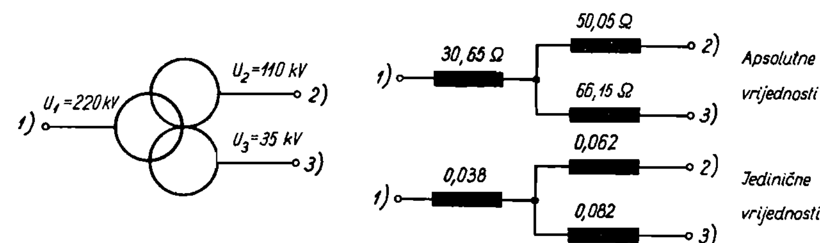
$$x' = \frac{X}{Z_{osn}} = X \frac{S_{osn}}{U^2_{osn}} \qquad \ldots (2.170)$$

Analogno tome jedinične vrijednosti preračunate na nove osnovne vrijednosti određuju se formulom

$$x_2 = x_1 \frac{U^2_{osn1}}{U^2_{osn2}} \frac{S_{osn2}}{S_{osn1}} \qquad \ldots (2.171)$$

gdje je x_2 jedinična vrijednost za osnovne vrijednosti s indeksom (2), a x_1 za osnovne vrijednosti s indeksom (1).

Na sl. 2.69 nacrtana je ekvivalentna shema mreže prikazane na sl. 2.66, s naznačenim jediničnim reaktancijama, i pomoćna tablica za određivanje jediničnih vrijednosti reaktancija. S određivanjem osnovnog napona počelo je od dijela mreže A. Za dio mreže B, koja je spojena s dije-



$x_{12}\,{}^0/_0 = 10^0/_0$ za 60 MVA
$x_{13}\,{}^0/_0 = 5^0/_0$ za 25 MVA
$x_{23}\,{}^0/_0 = 6^0/_0$ za 25 MVA

	U_n kV	S MVA	x	S_{osn} MVA	U_{osn} kV	$\left(\frac{U_n}{U_{osn}}\right)^2$	$\frac{S_{osn}}{S}$	$\left(\frac{U_n}{U_{osn}}\right)^2 \frac{S_{osn}}{S}$	x
1—2	220	60	0,10	60	220	1,000	1,000	1,000	0,100
1—3	220	25	0,05	60	220	1,000	2,400	2,400	0,120
2—3	110	25	0,06	60	110	1,000	2,400	2,400	0,144

$$x_1 = \frac{1}{2}(x_{12} + x_{13} - x_{23}) = \frac{1}{2}(0{,}100 + 0{,}120 - 0{,}144) = 0{,}038$$

$$x_2 = \frac{1}{2}(x_{12} + x_{23} - x_{13}) = \frac{1}{2}(0{,}100 + 0{,}144 - 0{,}120) = 0{,}062$$

$$x_3 = \frac{1}{2}(x_{13} + x_{23} - x_{12}) = \frac{1}{2}(0{,}120 + 0{,}144 - 0{,}100) = 0{,}082$$

Slika 2.70. Određivanje jediničnih reaktancija tronamotnog transformatora

lom A preko transformatora prijenosnog odnosa 10,5/115 kV, osnovni napon određuje se iz relacije

$$U_{osnB} = U_{osnA} \frac{U_B}{U_A} \qquad \dots (2.172)$$

gdje je U_B/U_A prijenosni omjer transformacije koja povezuje dva dijela mreže (U_A je napon na strani dijela mreže A, a U_B na strani dijela mreže B). Određivanje jediničnih reaktancija za generatore i transformatore vršeno je prema formuli (2.168), dok su jedinične reaktancije vodova određene iz izraza

$$x = \frac{X}{X_{osn}} \qquad \dots (2.173)$$

Da bismo ilustrirali na još jednom primjeru određivanje jediničnih reaktancija, odredimo jedinične reaktancije za tronamotni transformator, o kojem su podaci naznačeni na sl. 2.70. U tablici na sl. 2.70 prikazano je određivanje jediničnih reaktancija, analogno tablici na sl. 2.69.

Naravno da se jedinične vrijednosti mogu upotrijebiti i za kompleksne izraze impedancija i snaga. Tako možemo napisati

$$z = \frac{Z}{Z_{osn}} = \frac{R + jX}{Z_{osn}} = \frac{R}{Z_{osn}} + j\frac{X}{Z_{osn}} = r + jx \qquad \dots (2.174)$$

i

$$s = \frac{S}{S_{osn}} = \frac{P + jQ}{S_{osn}} = \frac{P}{S_{osn}} + j\frac{Q}{S_{osn}} = p + jq \qquad \dots (2.175)$$

gdje su r jedinični djelatni otpor, x jedinična reaktancija, p jedinična djelatna snaga, a q jedinična jalova snaga. U relaciji (2.174) Z_{osn} je apsolutna vrijednost osnovne impedancije.

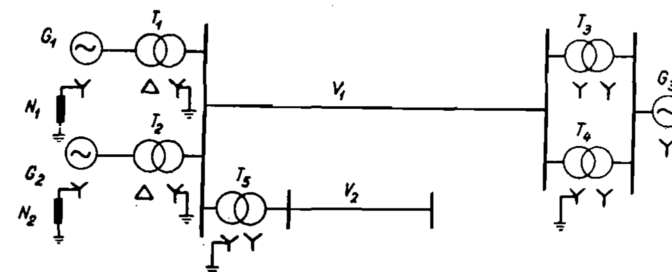
B. Ekvivalentne sheme direktnog, inverznog i nultog sistema

Pri određivanju struja kratkog spoja potrebno je poznavati ekvivalentne sheme svih triju sistema: direktnog, inverznog i nultog.

U ekvivalentnim shemama direktnog i inverznog sistema sve nul-tačke generatora i potrošača spojene su na povratni vod. U shemi nultog sistema nul-tačke su spojene s povratnim vodom samo kad su nul-tačke uzemljene bilo neposredno bilo preko impedancije.

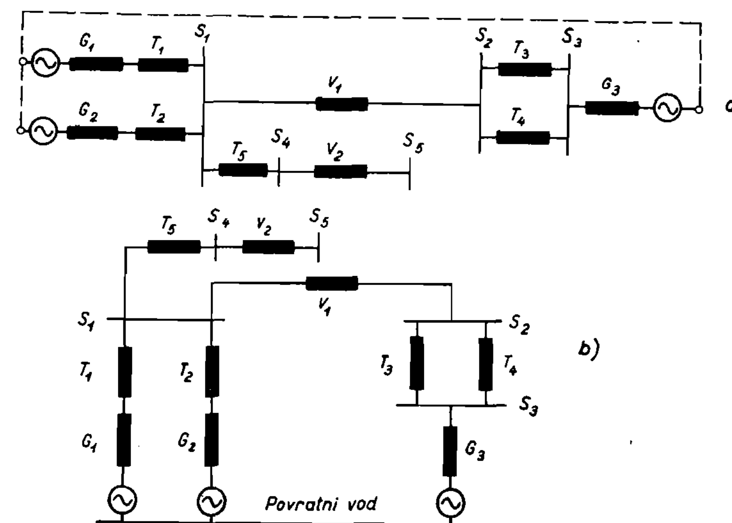
Na slici 2.71 prikazana je jednopolna shema mreže, za koju je na slici 2.72 nacrtana shema direktnog sistema (koja je istodobno i shema inverznog sistema, ali bez simbola za generatore, jer normalno računamo da elektromotorna sila postoji samo u direktnom sistemu), a na sl. 2.73 shema nultog sistema. Ekvivalentne sheme nacrtane su na dva načina: prvi s rasporedom elemenata shema kakav je na jednopolnoj shemi, da bi se lakše opazila veza između jednopolne i ekvivalentne sheme, i drugi s takvim rasporedom elemenata sheme da bi povratni vod

došao na dno sheme, jer je takav način prikazivanja pogodniji za transformaciju sheme.

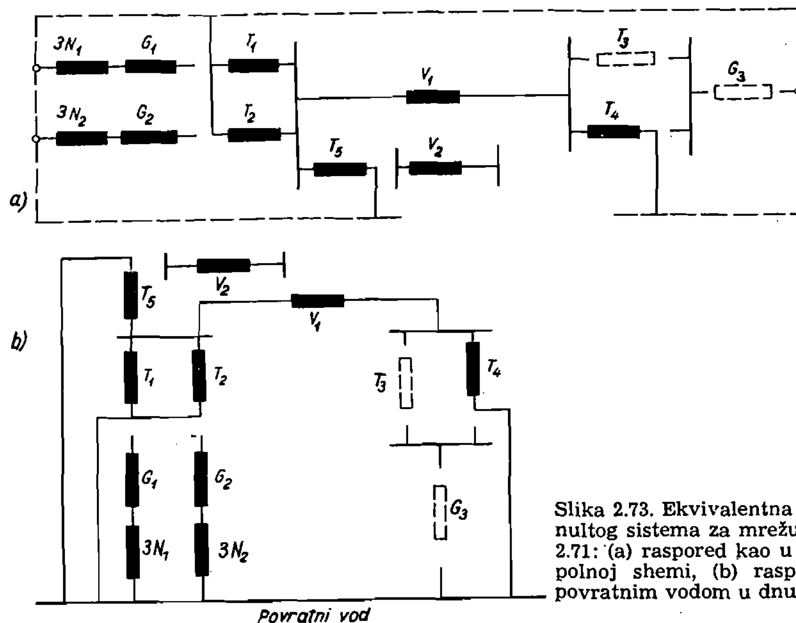


Slika 2.71. Primjer jednopolne sheme mreže

Kao što se vidi na sl. 2.73, pojedini dijelovi u ekvivalentnoj shemi nultog sistema potpuno su odijeljeni od ostale mreže, što je posljedica nemogućnosti zatvaranja strujnog kruga nultog sistema (npr. transformator T_3 u spoju zvijezda-zvijezda bez uzemljene nul-tačke). Na daljnja pojednostavnjanja ekvivalentne sheme takvi dijelovi mreže neće imati nikakvog utjecaja. Uzemljenja su spojena na povratni vod, jer je pretpostavljeno da on ima potencijal zemlje.



Slika 2.72. Ekvivalentna shema direktnog i inverznog sistema za mrežu na sl. 2.71: (a) raspored kao u jednopolnoj shemi, (b) raspored s povratnim vodom u dnu sheme



Slika 2.73. Ekvivalentna shema nultog sistema za mrežu na sl. 2.71: (a) raspored kao u jednopolnoj shemi, (b) raspored s povratnim vodom u dnu sheme

Pojednostavnjenjem ekvivalentnih shema (paralelnim i serijskim spajanjem reaktancija, transfiguracijama iz zvijezde u trokut ili obrnuto) dolazi se do shema s kojima se ulazi u daljnji račun.

TREĆE POGLAVLJE

STRUJE KRATKOG SPOJA

3.1. OSNOVNE PRETPOSTAVKE

Prilikom određivanja struja kratkog spoja pretpostavljamo da generator proizvodi simetrične elektromotorne sile. Prema tome je

$$\mathbf{E}_R = \mathbf{E}_d \quad \text{. . . (3.1a)}$$

$$\mathbf{E}_S = a^2\mathbf{E}_d \quad \text{. . . (3.1b)}$$

$$\mathbf{E}_T = a\,\mathbf{E}_d \quad \text{. . . (3.1c)}$$

gdje su $\mathbf{E}_R$, $\mathbf{E}_S$, $\mathbf{E}_T$ fazne elektromotorne sile, a $\mathbf{E}_d$ fazna elektromotorna sila direktnog sistema. Prema (2.18c) za elektromotornu silu inverznog sistema možemo postaviti

$$\mathbf{E}_i = \frac{1}{3}\,(\mathbf{E}_R + a^2\mathbf{E}_S + a\,\mathbf{E}_T) \quad \text{. . . (3.2)}$$

Uvrštavanjem vrijednosti (3.1), te uzevši u obzir da je $a^4 = a$ (2.8a), dobivamo

$E_i = \frac{1}{3}(E_d + a^4 E_d + a^2 E_d)$

$$\mathbf{E}_i = \frac{1}{3}\,\mathbf{E}_d\,(1 + \underbrace{a + a^2}_{-1}) = 0 \quad \text{. . . (3.3)}$$

Za elektromotornu silu nultog sistema možemo postaviti (2.18 a)

$$\mathbf{E}_o = \frac{1}{3}\,(\mathbf{E}_R + \mathbf{E}_S + \mathbf{E}_T) = 0 \quad \text{. . . (3.4)}$$

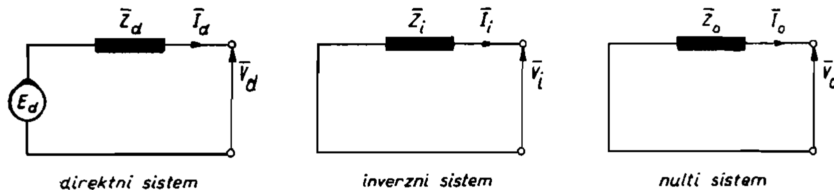
jer je suma simetričnih elektromotornih sila jednaka nuli Uzevši u obzir relacije (2.19) dolazimo prema tome do polaznih odnosa

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_d \quad \text{. . . (3.5a)}$$

$$\mathbf{V}_i = -\mathbf{I}_i\,\mathbf{Z}_i \quad \text{. . . (3.5b)}$$

$$\mathbf{V}_o = -\mathbf{I}_o\,\mathbf{Z}_o \quad \text{. . . (3.5c)}$$

što možemo prikazati ekvivalentnim shemama na sl. 3.1.



Slika 3.1. Ekvivalentna shema direktnog, inverznog i nultog sistema za slučaj simetričnih elektromotornih sila generatora

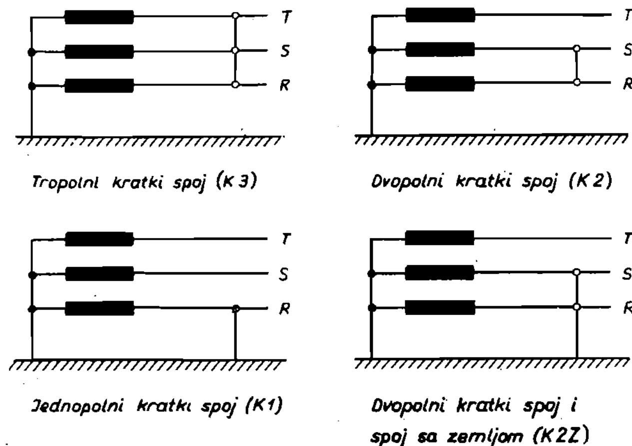
Budući da se proračun kratkog spoja provodi uz pretpostavku da je promatrana mreža u praznom hodu, elektromotorna sila $\mathbf{E}_d$ jednaka je po iznosu nazivnom faznom naponu V_n generatora. Kad bi se pošlo od opterećene mreže, za $\mathbf{E}_d$ trebalo bi uvrstiti elektromotornu silu koja djeluje na početnu reaktanciju, kao što predviđaju njemački propisi (Lit. 20).

Razmatranja prilika za sve vrste kratkog spoja provedena su s impedancijama, dakle uz pretpostavku da se ne zanemaruje utjecaj djelatnog otpora. U svim numeričkim primjerima međutim zanemaren je djelatni otpor. U tom slučaju mjesto impedancije ($\mathbf{Z}$) u formule treba uvrstiti reaktanciju (jX).

3.2. KRATKI SPOJ U TROFAZNOJ MREŽI

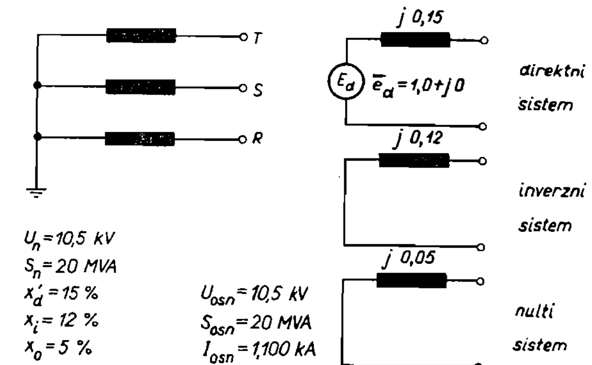
A. Vrste kratkih spojeva

U trofaznim mrežama razlikujemo četiri vrste kratkih spojeva (sl. 3.2): tropolni (K3), jednopolni (K1), dvopolni (K2) i dvopolni kratki spoj s istovremenim spojem sa zemljom (K2Z).

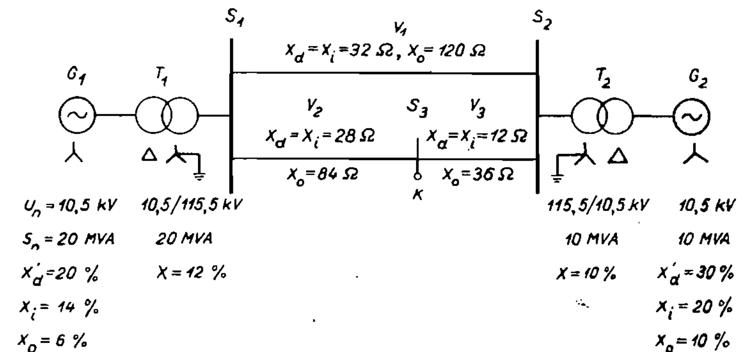


Slika 3.2. Vrste kratkog spoja

vremenim spojem sa zemljom (K2Z). Jednopolni kratki spoj i dvopolni kratki spoj s istovremenim spojem sa zemljom imaju značenje kratkog spoja samo onda ako je nul-tačka mreže uzemljena. U mreži u kojoj nul-tačka nije neposredno uzemljena (odnosno nije uzemljena preko relativno malog otpora) spoj jedne faze sa zemljom dovodi do zemnog spoja, koji nema karakteristike kratkog spoja, jer se pojavljuju relativno male kapacitivne struje.



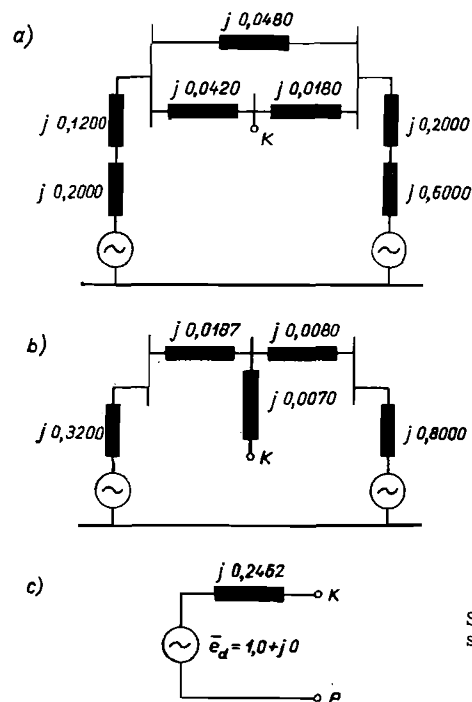
Slika 3.3. Shema spoja generatora i ekvivalentne sheme



		U_n kV	S_n MVA	x_d	x_i	x_o	S_{osn} MVA	U_{osn} kV	Z_{osn} Ω	I_{osn} kA	$\left(\frac{U_n}{U_{osn}}\right)^2$	$\frac{S_{osn}}{S_n}$	$\left(\frac{U_n}{U_{osn}}\right)^2 \frac{S_{osn}}{S_n}$	x_d	x_i	x_o
A	G_1	10,5	20	0,20	0,14	0,06	20	10,5	—	1,100	1,000	1,000	1,000	0,200	0,140	0,060
	T_1	10,5	20	0,12	0,12	0,12	20	10,5	—	1,100	1,000	1,000	1,000	0,120	0,120	0,120
B	V_1	110	—	32Ω	32Ω	120Ω	20	115,5	667,4	0,100	—	—	—	0,048	0,048	0,180
	V_2	110	—	28Ω	28Ω	84Ω	20	115,5	667,4	0,100	—	—	—	0,042	0,042	0,126
	V_3	110	—	12Ω	12Ω	36Ω	20	115,5	667,4	0,100	—	—	—	0,018	0,018	0,054
C	T_2	10,5	10	0,10	0,10	0,10	20	10,5	—	1,100	1,000	2,000	2,000	0,200	0,200	0,200
	G_2	10,5	10	0,30	0,20	0,10	20	10,5	—	1,100	1,000	2,000	2,000	0,600	0,400	0,200

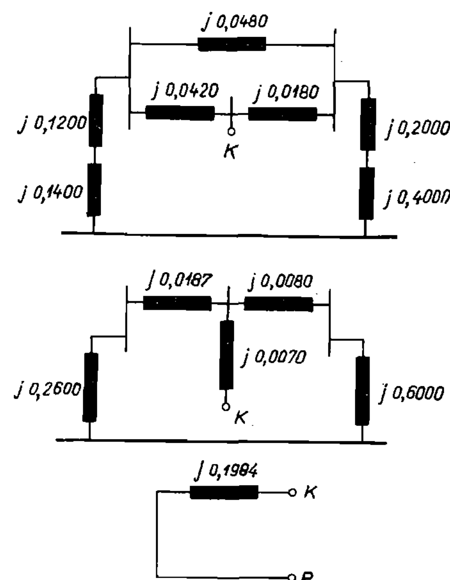
Slika 3.4. Shema spoja mreže i tablica za određivanje jediničnih reaktancija

O vrsti kratkog spoja ovise prilike u mreži za vrijeme trajanja kvara, pa je potrebno svaku vrstu kvara promotriti posebno. Pri određivanju prilika treba postupiti na slijedeći način: odrediti struje i napone na mjestu kvara jednadžbama koje karakteriziraju vrstu kratkog spoja, odrediti pomoću struja i napona u fazama veličine simetričnih komponenata, i na kraju postaviti izraze koji karakteriziraju međusobnu vezu ekvivalentnih shema direktnog, inverznog i nultog sistema. Postupak ćemo najbolje rastumačiti prikazom pojedinih kvarova.

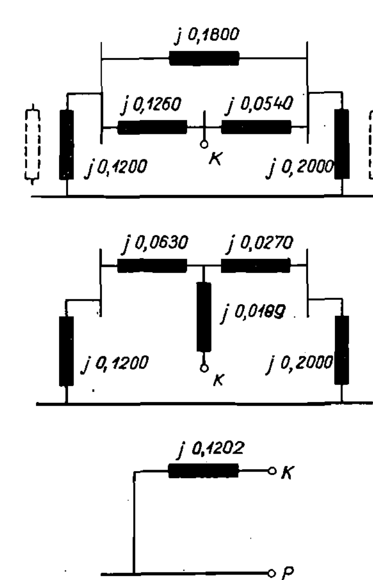


Slika 3.5. Ekvivalentna shema direktnog sistema mreže na sl. 3.4.

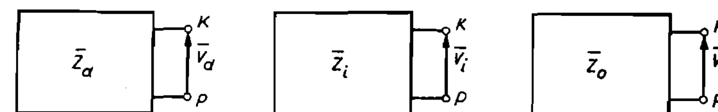
Prikazi pojedinih vrsta kratkog spoja bit će popraćeni sa po dva numerička primjera. Prvi, gdje se pretpostavlja da kratki spoj nastaje na stezaljkama generatora (sl. 3.3), i drugi, pri kojem kratki spoj nastaje na sabirnicama s_3 (sl. 3.4). Na sl. 3.3. prikazana je shema spoja generatora s neposredno uzemljenom nul-tačkom, te ekvivalentne sheme s označenim jediničnim reaktancijama. Shema mreže prikazana je na sl. 3.4, dok su ekvivalentne sheme ucrtane na sl. 3.5, 3.6. i 3.7. Ekvivalentne sheme, nakon transfiguracije trokuta u zvijezdu, pojednostavnjene su i svedene na jednu reaktanciju. Svaki sistem, dakle, zamjenjuje jedna ekvivalentna shema sa dva kraja K (mjesto kratkog spoja) i P (povratni vod). Za principijelna razmatranja može se dakle ekvivalentna shema zamijeniti s pravokutnikom sa dvije priključnice, kao što je prikazano na sl. 3.8.



Slika 3.6. Ekvivalentna shema inverznog sistema mreže na sl. 3.4.



Slika 3.7. Ekvivalentna shema nultog sistema mreže na sl. 3.4.



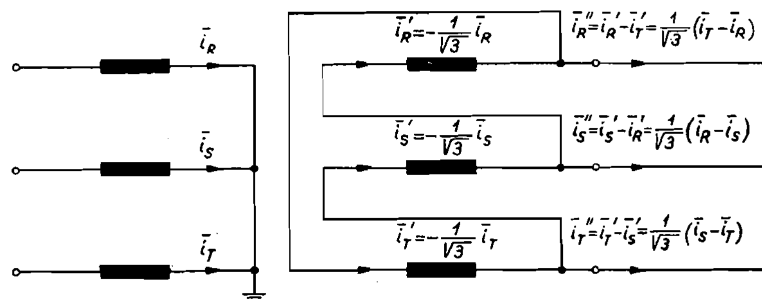
Slika 3.8. Pojednostavnjeni prikaz ekvivalentnih shema direktnog, inverznog i nultog sistema

B. Utjecaj transformacije na određivanje struja kvara

Struje i napone iz ekvivalentnih shema treba preračunati u struje i napone u pojedinim fazama, što je i krajnji cilj računa. Jednostavno preračunavanje prema izrazima (2.16) moguće je samo onda, ako se u mreži ne nalaze transformatori, odnosno ako postoje transformatori samo u spoju Yy0, jer u tom slučaju nema zakretanja ni vektora struje, ni vektora napona. Za svaki drugi spoj međutim treba uzeti u obzir i ta zakretanja. U ovim razmatranjima zanemarena je struja magnetiziranja, jer se radi o proračunu struja kratkog spoja (tač. 2.4).

Promotrimo spoj zvijezda-trokut (sl. 3.9), a radi pojednostavnjenja račun provedimo za slučaj da je prijenosni omjer 1 : 1 (omjer napona, a ne omjer zavoja!). U tom se slučaju struja koja teče u namotu spojenom u zvijezdu transformira — u namotu spojenom u trokut — u struju suprotna smjera, koja je za $\sqrt{3}$ manja od struje u namotu spojenom u

zvijezdu, jer namot spojen u trokut ima za $\sqrt{3}$ veći broj zavoja. Na priključnice namota spojenog u trokut međutim izlazi struja koja je razlika struje dvaju namota. Uzevši u obzir prikaz na sl. 3.9, možemo struje u namotu spojenom u trokut ($\mathbf{i}_R'$, $\mathbf{i}_S'$ i $\mathbf{i}_T'$) prikazati strujama u namotu spojenom u zvijezdu, relacijama (računato s jediničnim vrijednostima struja)



Slika 3.9. Struje transformatora u spoju zvijezda-trokut

$$\mathbf{i}_R' = -\frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{i}_R \qquad \ldots (3.6a)$$

$$\mathbf{i}_S' = -\frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{i}_S \qquad \ldots (3.6b)$$

$$\mathbf{i}_T' = -\frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{i}_T \qquad \ldots (3.6c)$$

dok za struje na priključnicama namota spojenog u trokut ($\mathbf{i}_R''$, $\mathbf{i}_S''$ i $\mathbf{i}_T''$) možemo napisati — uzevši u obzir i (3.6)

$$\mathbf{i}_R'' = \mathbf{i}_R' - \mathbf{i}_T' = \frac{1}{\sqrt{3}}(\mathbf{i}_T - \mathbf{i}_R) \qquad \ldots (3.7a)$$

$$\mathbf{i}_S'' = \mathbf{i}_S' - \mathbf{i}_R' = \frac{1}{\sqrt{3}}(\mathbf{i}_R - \mathbf{i}_S) \qquad \ldots (3.7b)$$

$$\mathbf{i}_T'' = \mathbf{i}_T' - \mathbf{i}_S' = \frac{1}{\sqrt{3}}(\mathbf{i}_S - \mathbf{i}_T) \qquad \ldots (3.7c)$$

Navedeni odnosi vrijede i za simetrične komponente struja. Neka su simetrične komponente struja na strani zvijezde $\mathbf{i}_d$, $\mathbf{i}_i$ i $\mathbf{i}_o$. Onda je

$$\mathbf{i}_{Rd} = \mathbf{i}_d; \quad \mathbf{i}_{Sd} = a^2\mathbf{i}_d; \quad \mathbf{i}_{Td} = a\,\mathbf{i}_d \qquad \ldots (3.8a)$$

$$\mathbf{i}_{Ri} = \mathbf{i}_i; \quad \mathbf{i}_{Si} = a\,\mathbf{i}_i; \quad \mathbf{i}_{Ti} = a^2\mathbf{i}_i \qquad \ldots (3.8b)$$

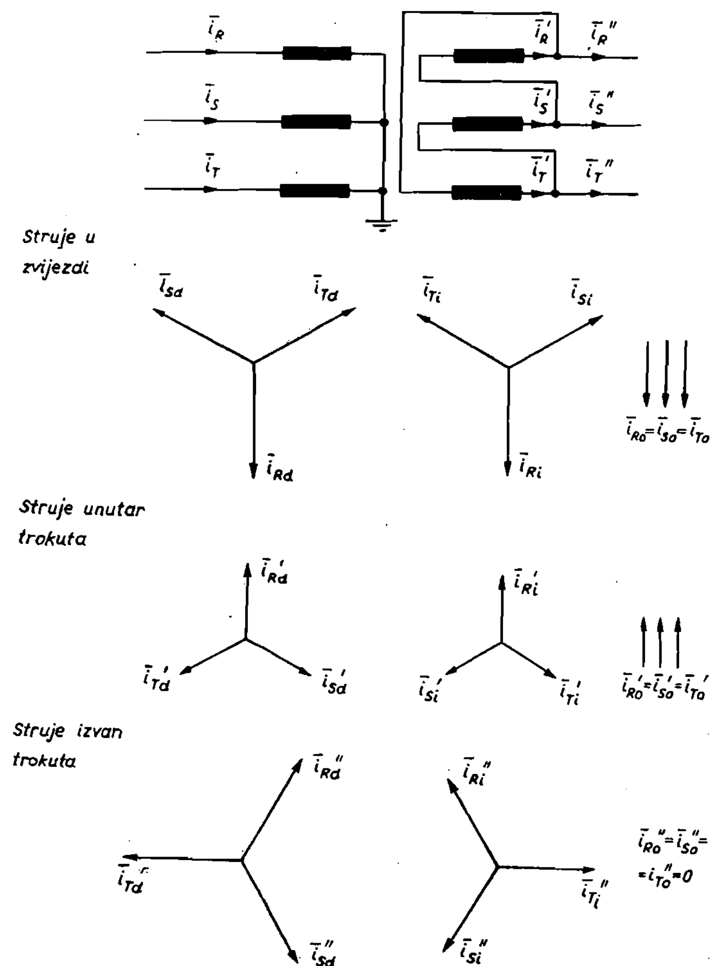
$$\mathbf{i}_{Ro} = \mathbf{i}_{So} = \mathbf{i}_{To} = \mathbf{i}_o \qquad \ldots (3.8c)$$

Struje su unutar namota u trokutu

$$\mathbf{i}_{Rd}' = -\frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{i}_d; \quad \mathbf{i}_{Sd}' = -\frac{1}{\sqrt{3}}a^2\mathbf{i}_d; \quad \mathbf{i}_{Td}' = -\frac{1}{\sqrt{3}}a\,\mathbf{i}_d \qquad \ldots (3.9a)$$

$$\mathbf{i}_{Ri}' = -\frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{i}_i; \quad \mathbf{i}_{Si}' = -\frac{1}{\sqrt{3}}a\,\mathbf{i}_i; \quad \mathbf{i}_{Ti}' = -\frac{1}{\sqrt{3}}a^2\mathbf{i}_i \qquad \ldots (3.9b)$$

$$\mathbf{i}_{Ro}' = \mathbf{i}_{So}' = \mathbf{i}_{To}' = -\frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{i}_o \qquad \ldots (3.9c)$$



Slika 3.10. Simetrične komponente struja u transformatoru spoja zvijezda-trokut

dok su struje direktnog sistema na priključnicama namota spojenog u trokut (3.7)

$$\mathbf{i}_{Rd}'' = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{i}_d\,(a - 1) \qquad \ldots (3.10a)$$

$$\mathbf{i}_{Sd}'' = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{i}_d\,(1 - a^2) \qquad \ldots (3.10b)$$

$$\mathbf{i}_{Td}'' = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{i}_d\,(a^2 - a) \qquad \ldots (3.10c)$$

Struje inverznog sistema možemo napisati u obliku

$$\mathbf{i}_{Ri}'' = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{i}_i\,(a^2 - 1) \qquad \ldots (3.11a)$$

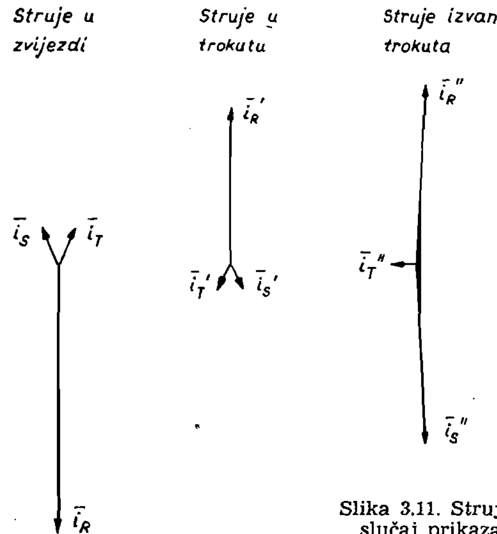
$$\mathbf{i}_{Si}'' = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{i}_i\,(1 - a) \qquad \ldots (3.11b)$$

$$\mathbf{i}_{Ti}'' = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{i}_i\,(a - a^2) \qquad \ldots (3.11c)$$

dok su struje nultog sistema

$$\mathbf{i}_{Ro}'' = \mathbf{i}_{So}'' = \mathbf{i}_{To}'' = 0$$

jer se struje nultog sistema ne mogu prenijeti preko trokuta (ekvivalentna shema za nulti sistem je prekinuta!). Simetrične komponente prikazane su na sl. 3.10.



Slika 3.11. Struje u fazama za slučaj prikazan na sl. 3.10.

Korištenjem relacija (2.4) i (2.5) za a i a^2, te zbrajanjem komponenata, dolazimo do struja u namotu spojenom u trokut

$$\mathbf{i}_R' = -0{,}577\,(\mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o) \qquad \ldots (3.12a)$$

$$\mathbf{i}_S' = 0{,}289\,(\mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i) - 0{,}577\,\mathbf{i}_o + j\,0{,}500\,(\mathbf{i}_d - \mathbf{i}_i) \qquad \ldots (3.12b)$$

$$\mathbf{i}_T' = 0{,}289\,(\mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i) - 0{,}577\,\mathbf{i}_o - j\,0{,}500\,(\mathbf{i}_d - \mathbf{i}_i) \qquad \ldots (3.12c)$$

Na isti način dolazimo do struja na stezaljkama namota spojenog u trokut

$$\mathbf{i}_R'' = -0{,}866\,(\mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i) + j\,0{,}500\,(\mathbf{i}_d - \mathbf{i}_i) \qquad \ldots (3.13a)$$

$$\mathbf{i}_S'' = 0{,}866\,(\mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i) + j\,0{,}500\,(\mathbf{i}_d - \mathbf{i}_i) \qquad \ldots (3.13b)$$

$$\mathbf{i}_T'' = -j\,(\mathbf{i}_d - \mathbf{i}_i) \qquad \ldots (3.13c)$$

Struje u fazama prikazane su na sl. 3.11.

Ako međutim pođemo od struja koje dolaze iz mreže na strani trokuta ($\mathbf{i}_R''$, $\mathbf{i}_S''$ i $\mathbf{i}_T''$), mora biti ispunjen uvjet da je $\mathbf{i}_R'' + \mathbf{i}_S'' + \mathbf{i}_T'' = 0$, jer se nulta struja ne može tada zatvoriti (sl. 3.12). Osim toga mora biti

$$\mathbf{i}_R' + \mathbf{i}_S' + \mathbf{i}_T' = 0 \qquad \ldots (3.14)$$

jer pretpostavljamo da u trokutu nema struje nulte komponente. Za struje u namotu spojenom u trokut možemo (sl. 3.12) postaviti

$$\mathbf{i}_R' - \mathbf{i}_T' = \mathbf{i}_R'' \qquad \ldots (3.15a)$$

$$\mathbf{i}_S' - \mathbf{i}_R' = \mathbf{i}_S'' \qquad \ldots (3.15b)$$

$$\mathbf{i}_T' - \mathbf{i}_S' = \mathbf{i}_T'' \qquad \ldots (3.15c)$$

odakle, uzevši u obzir i relaciju (3.14), dobivamo

$$\mathbf{i}_R' = \frac{1}{3}\,(\mathbf{i}_R'' - \mathbf{i}_S'') \qquad \ldots (3.16a)$$

$$\mathbf{i}_S' = \frac{1}{3}\,(\mathbf{i}_S'' - \mathbf{i}_T'') \qquad \ldots (3.16b)$$

$$\mathbf{i}_T' = \frac{1}{3}\,(\mathbf{i}_T'' - \mathbf{i}_R'') \qquad \ldots (3.16c)$$

Struje u namotu spojenom u zvijezdu — iz razloga navedenih ranije — imaju negativan predznak i za $\sqrt{3}$ puta su veće od struja u namotu spojenom u trokut, pa kad još uzmemo u obzir relacije (3.16), imamo

$$\mathbf{i}_R = -\mathbf{i}_R'\sqrt{3} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,(\mathbf{i}_S'' - \mathbf{i}_R'') \qquad \ldots (3.17a)$$

$$\mathbf{i}_S = -\mathbf{i}_S'\sqrt{3} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,(\mathbf{i}_T'' - \mathbf{i}_S'') \qquad \ldots (3.17b)$$

$$\mathbf{i}_T = -\mathbf{i}_T'\sqrt{3} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,(\mathbf{i}_R'' - \mathbf{i}_T'') \qquad \ldots (3.17c)$$

Ako struje $\mathbf{i}_R''$, $\mathbf{i}_S''$ i $\mathbf{i}_T''$ rastavimo na simetrične komponente prema (3,8), za struje direktnog sistema u namotu spojenom u trokut moći ćemo pisati — uzevši u obzir (3.16)

$$\mathbf{i}_{Rd}' = \frac{1}{3}\,\mathbf{i}_d''\,(1 - a^2) \qquad \ldots (3.18a)$$

$$\mathbf{i}_{Sd}' = \frac{1}{3}\,\mathbf{i}_d''\,(a^2 - a) \qquad \ldots (3.18b)$$

$$\mathbf{i}_{Td}' = \frac{1}{3}\,\mathbf{i}_d''\,(a - 1) \qquad \ldots (3.18c)$$

dok za struje inverznog sistema dobivamo

$$\mathbf{i}_{Ri}' = \frac{1}{3}\,\mathbf{i}_i''\,(1 - a) \qquad \ldots (3.19a)$$

$$\mathbf{i}_{Si}' = \frac{1}{3}\,\mathbf{i}_i''\,(a - a^2) \qquad \ldots (3.19b)$$

$$\mathbf{i}_{Ti}' = \frac{1}{3}\,\mathbf{i}_i''\,(a^2 - 1) \qquad \ldots (3.19c)$$

Za struje direktnog sistema u namotu spojenom u zvijezdu prema (3.17) imamo

$$\mathbf{i}_{Rd} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{i}_d''\,(a^2 - 1) \qquad \ldots (3.20a)$$

$$\mathbf{i}_{Sd} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{i}_d''\,(a - a^2) \qquad \ldots (3.20b)$$

$$\mathbf{i}_{Td} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{i}_d''\,(1 - a) \qquad \ldots (3.20c)$$

dok su struje inverznog sistema

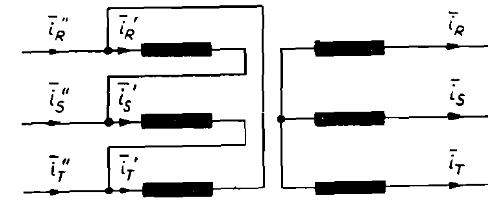
$$\mathbf{i}_{Ri} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{i}_i''\,(a - 1) \qquad \ldots (3.21a)$$

$$\mathbf{i}_{Si} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{i}_i''\,(a^2 - a) \qquad \ldots (3.21b)$$

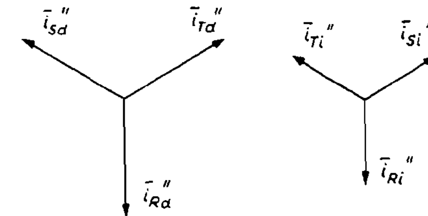
$$\mathbf{i}_{Ti} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{i}_i''\,(1 - a^2) \qquad \ldots (3.21c)$$

Simetrične komponente struja, kad polazimo od mreže na strani namota spojenog u trokut, prikazane su na sl. 3.12.

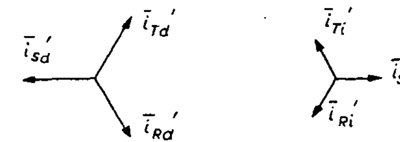
Pomoću simetričnih komponenata struja određujemo struje u pojedinim namotima spoja u trokutu iz relacija



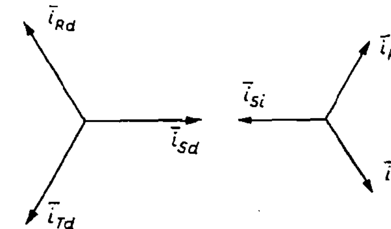
Struje izvan trokuta



Struje u trokutu



Struje u zvijezdi



Slika 3.12. Simetrične komponente struje u transformatoru spoja trokut-zvijezda

$$\mathbf{i}_R' = 0{,}500\,(\mathbf{i}_d'' + \mathbf{i}_i'') + j\,0{,}289\,(\mathbf{i}_d'' - \mathbf{i}_i'') \qquad \ldots (3.22a)$$

$$\mathbf{i}_S' = -\,j\,0{,}577\,(\mathbf{i}_d'' - \mathbf{i}_i'') \qquad \ldots (3.22b)$$

$$\mathbf{i}_T' = -\,0{,}500\,(\mathbf{i}_d'' + \mathbf{i}_i'') + j\,0{,}289\,(\mathbf{i}_d'' - \mathbf{i}_i'') \qquad \ldots (3.22c)$$

dok su struje u namotima spojenim u zvijezdu

$$\mathbf{i}_R = -\,0{,}866\,(\mathbf{i}_d'' + \mathbf{i}_i'') - j\,0{,}500\,(\mathbf{i}_d'' - \mathbf{i}_i'') \qquad \ldots (3.23a)$$

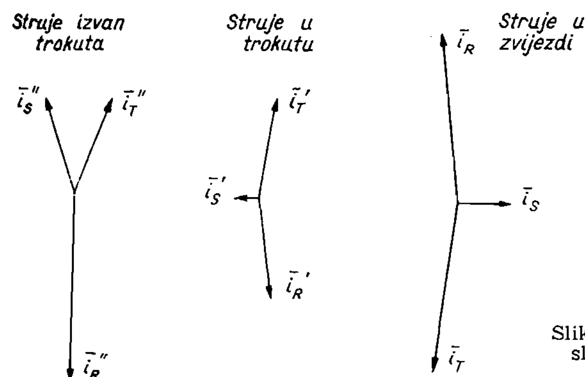
$$\mathbf{i}_S = j\,(\mathbf{i}_d'' - \mathbf{i}_i'') \qquad \ldots (3.23b)$$

$$\mathbf{i}_T = 0{,}866\,(\mathbf{i}_d'' + \mathbf{i}_i'') - j\,0{,}500\,(\mathbf{i}_d'' - \mathbf{i}_i''). \qquad \ldots (3.23c)$$

Na sl. 3.13 prikazane su struje u fazama, koje odgovaraju simetričnim komponentama na sl. 3.12.

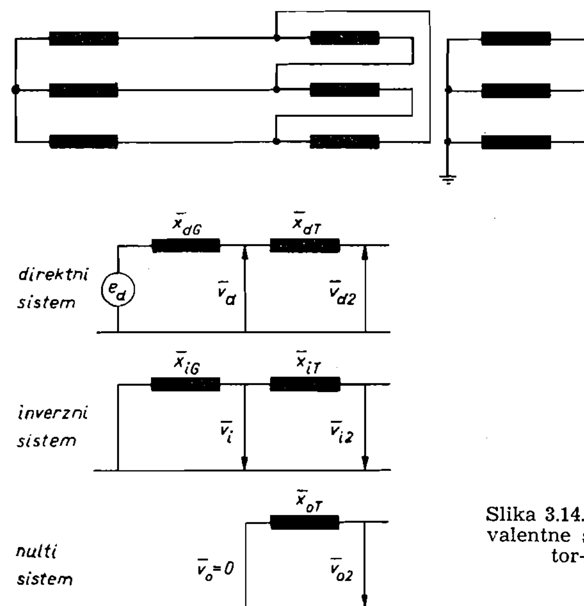
Prilikom određivanja struja u namotu spojenom u zvijezdu, a polazeći od struja u mreži na strani trokuta, treba naglasiti da je nulta komponenta struje neodređena, ta komponenta naime može, ali ne mora, postojati u mreži na strani zvijezde, no to nije moguće odrediti promatrajući struje u mreži na strani trokuta. Kad bi poznavali nultu komponentu struje ($\mathbf{i}'_0$) unutar trokuta relacija (3.14) bi glasila $\mathbf{i}'_R + \mathbf{i}'_S + \mathbf{i}'_T = 3\,\mathbf{i}'_0$ pa bi se u (3.16) na desnoj strani pojavio još član $\mathbf{i}'_0$. To međutim nema utjecaja na određivanje struja direktnog i inverznog sistema, jer za njih vrijedi relacija (3.14). Naravno da bi se u tom slučaju u namotima spojenim u zvijezdu morala pojaviti i nulta komponenta struje.

Dalje treba naglasiti da izrazi za struje vrijede samo za spoj prikazan na sl. 3.10 i sl. 3.12, dok za ostale spojeve transformatora treba provesti analogan postupak. Za transformator YyO međutim nije potrebna nikakova posebna analiza, dovoljno je poći od simetričnih komponenata, pa odrediti jedinične vrijednosti struja kao da transformacija ne postoji.

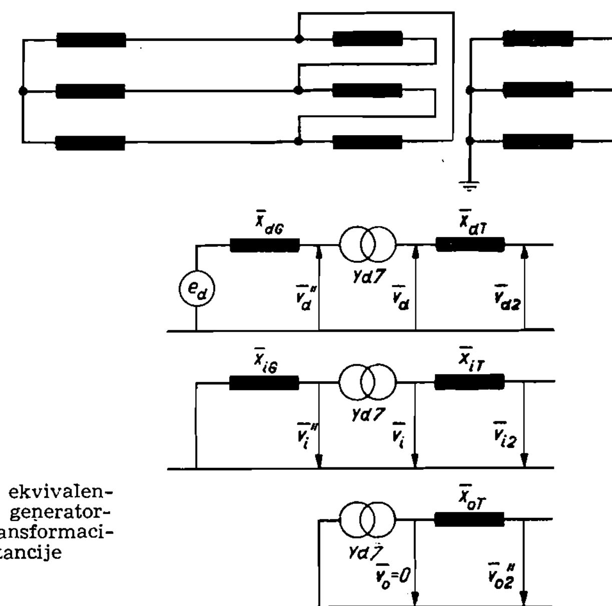


Slika 3.13. Struje u fazama za slučaj prikazan na sl. 3.12.

Pri određivanju napona potrebno je također uzeti u obzir zakretanje, zbog postojanja transformatora. Pođimo od mreže na strani namota spojenog u zvijezdu, koji nazovimo sekundarnim namotom. Iz struja i reaktancija u ekvivalentnim shemama određujemo simetrične komponente napona u bilo kojoj tački mreže. Na sl. 3.14. prikazana je shema spoja i ekvivalentne sheme bloka generator-transformator. Naponi $\mathbf{v}_{d2}$, $\mathbf{v}_{i2}$ i $\mathbf{v}_{o2}$ predstavljaju napone na sekundarnim stezaljkama transformatora, a $\mathbf{v}_d$, $\mathbf{v}_i$ i $\mathbf{v}_o$ napone na primarnim stezaljkama transformatora. Razlike između tih napona padovi su napona u reaktancijama transformatora, kad ne bi bilo zakretanja vektora napona radi spoja transformatora. Moramo međutim uzeti u obzir i zakretanje vektora napona radi sheme spoja transformatora, pa zato zamijenimo ekvivalentne sheme na sl. 3.14 ekvivalentnim shemama na sl. 3.15, u kojima je ucrtan i transformator bez reaktancije, jer njegova je reaktancija posebno označena (x_{dT}, x_{iT} i x_{oT}). Tada polazimo od napona $\mathbf{v}_d$ i $\mathbf{v}_i$ ($\mathbf{v}_o = 0$) koji su već određeni, uzimajući u obzir pad napona u reaktancijama, pa račun provodimo za trans-

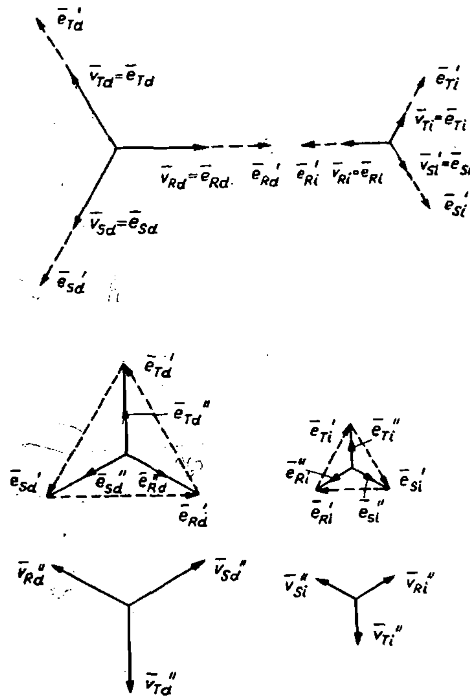


Slika 3.14. Shema spoja i ekvivalentne sheme bloka generator-transformator



Slika 3.15. Shema i ekvivalentne sheme bloka generator-transformator s transformacijom bez reaktancije

formator bez reaktancije. Račun dakle provodimo kao da na stezaljkama namota bez reaktancije, spojenih u zvijezdu, vladaju naponi $\mathbf{v}_d$ i $\mathbf{v}_i$. Komponente tih napona ($\mathbf{v}_{Rd}$, $\mathbf{v}_{Sd}$, $\mathbf{v}_{Td}$ i $\mathbf{v}_{Ri}$, $\mathbf{v}_{Si}$, $\mathbf{v}_{Ti}$) prikazane su na sl. 3.16. Budući da su $\mathbf{v}_d$ i $\mathbf{v}_i$ naponi na namotima transformatora bez



Slika 3.16. Naponi i elektromotorne sile u transformaciji zvijezda-trokut (sl. 3.14.)

reaktancija, elektromotorne sile ($\mathbf{e}_{Rd} \ldots \mathbf{e}_{Ri} \ldots$) jednake su naponima. Elektromotorne sile u namotu spojenom u trokut ($\mathbf{e}_{Rd}' \ldots \mathbf{e}_{Ri}' \ldots$) za $\sqrt{3}$ puta su veće od elektromotornih sila u namotu spojenom u zvijezdu, zbog većeg broja zavoja. Radi toga možemo za direktni sistem postaviti

$$\mathbf{e}_{Rd}' = \mathbf{v}_d \sqrt{3} \qquad \ldots (3.24a)$$

$$\mathbf{e}_{Sd}' = a^2 \, \mathbf{v}_d \sqrt{3} \qquad \ldots (3.24b)$$

$$\mathbf{e}_{Td}' = a \, \mathbf{v}_d \sqrt{3} \qquad \ldots (3.24c)$$

a za inverzni sistem

$$\mathbf{e}_{Ri}' = \mathbf{v}_i \sqrt{3} \qquad \ldots (3.25a)$$

$$\mathbf{e}_{Si}' = a \, \mathbf{v}_i \sqrt{3} \qquad \ldots (3.25b)$$

$$\mathbf{e}_{Ti}' = a^2 \mathbf{v}_i \sqrt{3} \qquad \ldots (3.25c)$$

To su linijske elektromotorne sile, pa fazne veličine dobivamo (sl. 3.16) iz relacija

$$\mathbf{e}_{Rd}' = \mathbf{e}_{Rd}'' - \mathbf{e}_{Sd}'' \qquad \ldots (3.26a)$$

$$\mathbf{e}_{Sd}' = \mathbf{e}_{Sd}'' - \mathbf{e}_{Td}'' \qquad \ldots (3.26b)$$

$$\mathbf{e}_{Td}' = \mathbf{e}_{Td}'' - \mathbf{e}_{Rd}'' \qquad \ldots (3.26c)$$

Uzevši u obzir da je $\mathbf{e}_{Rd}'' + \mathbf{e}_{Sd}'' + \mathbf{e}_{Td}'' = 0$, dolazimo do faznih elektromotornih sila

$$\mathbf{e}_{Rd}'' = \frac{1}{3} (\mathbf{e}_{Rd}' - \mathbf{e}_{Td}') \qquad \ldots (3.27a)$$

$$\mathbf{e}_{Sd}'' = \frac{1}{3} (\mathbf{e}_{Sd}' - \mathbf{e}_{Rd}') \qquad \ldots (3.27b)$$

$$\mathbf{e}_{Td}'' = \frac{1}{3} (\mathbf{e}_{Td}' - \mathbf{e}_{Sd}') \qquad \ldots (3.27c)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz (3.24), kad znamo da elektromotorna sila ima suprotan predznak od narinutog napona, dobivamo za narinute napone na primarnoj strani

$$\mathbf{v}_{Rd}'' = -\frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{v}_d (1 - a) \qquad \ldots (3.28a)$$

$$\mathbf{v}_{Sd}'' = -\frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{v}_d (a^2 - 1) \qquad \ldots (3.28b)$$

$$\mathbf{v}_{Td}'' = -\frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{v}_d (a - a^2) \qquad \ldots (3.28c)$$

Isti postupak možemo provesti za inverzni sistem napona, pa ćemo dobiti

$$\mathbf{v}_{Ri}'' = -\frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{v}_i (1 - a^2) \qquad \ldots (3.29a)$$

$$\mathbf{v}_{Si}'' = -\frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{v}_i (a - 1) \qquad \ldots (3.29b)$$

$$\mathbf{v}_{Ti}'' = -\frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{v}_i (a^2 - a) \qquad \ldots (3.29c)$$

I sada možemo uzeti u obzir (2.4) i (2.5), pa za napone na strani trokuta dobivamo

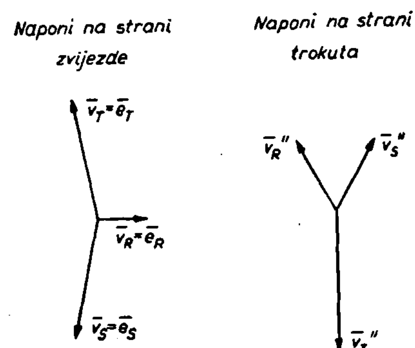
$$\mathbf{v}_R'' = -0{,}866 \, (\mathbf{v}_d + \mathbf{v}_i) + j \, 0{,}500 \, (\mathbf{v}_d - \mathbf{v}_i) \qquad \ldots (3.30a)$$

$$\mathbf{v}_S'' = 0{,}866 \, (\mathbf{v}_d + \mathbf{v}_i) + j \, 0{,}500 \, (\mathbf{v}_d - \mathbf{v}_i) \qquad \ldots (3.30b)$$

$$\mathbf{v}_T'' = -j \, (\mathbf{v}_d - \mathbf{v}_i) \qquad \ldots (3.30c)$$

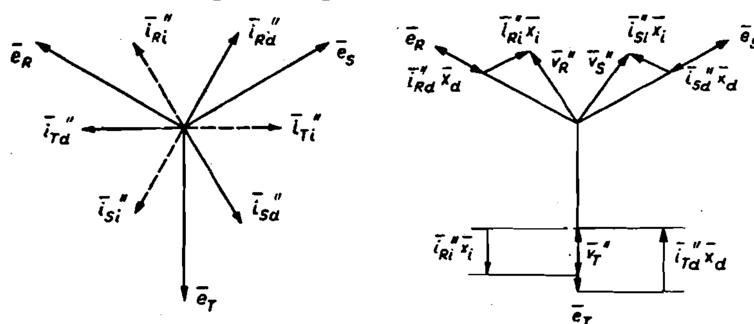
Na sl. 3.17 prikazani su fazni naponi određeni za prilike prikazane na sl. 3.16.

Do istih napona na primarnim stezaljkama transformatora (v_R'', v_S'', v_T'') dolazimo ako pođemo od elektromotornih sila u generatoru (zakrenutih za 210° prema naponima u mreži na sekundarnoj strani transformatora) i od elektromotorne sile odbijemo padove napona u direktnoj i



Slika 3.17. Fazni naponi u transformatoru zvijezda-trokut (bez padova napona)

inverznoj reaktanciji. Naravno da samo direktna komponenta struje izaziva pad napona u direktnoj reaktanciji, a inverzna komponenta struje u inverznoj reaktanciji. Na sl. 3.18 prikazane su elektromotorne sile, komponente struja (sl. 3.10), padovi napona i naponi na stezaljkama generatora, odnosno naponi na primarnim stezaljkama transformatora.



Slika 3.18. Određivanje napona na stezaljkama generatora (primarnim stezaljkama transformatora) pomoću padova napona u generatoru

C. Tropolni kratki spoj

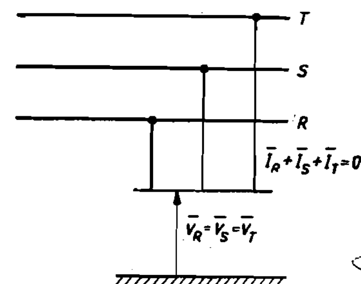
Tropolni kratki spoj možemo prikazati shemom na sl. 3.19. Prilike za slučaj tropolnog kratkog spoja karakterizirane su relacijama

$$\mathbf{V}_R = \mathbf{V}_S = \mathbf{V}_T \qquad \ldots (3.31)$$

$$\mathbf{I}_R + \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T = 0 \qquad \ldots (3.32)$$

Pomoću tih relacija određujemo vrijednosti komponenata struje i napona. Napon direktnog sistema zadan je izrazom (2.18b) pomoću kojega uvrštavanjem vrijednosti iz (3.31) dobivamo

$I_d = \frac{1}{3}(I_R + a I_S + a^2 I_T)$



Slika 3.19. Prikaz tropolnog kratkog spoja

$$\mathbf{V}_d = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + a\mathbf{V}_S + a^2\mathbf{V}_T) =$$

$$= \frac{1}{3}\mathbf{V}_R(1 + a + a^2) = 0 \qquad \ldots (3.33)$$

Za napon inverznog sistema — koristeći izraze (2.18c) i (3.31) — dobivamo

$$\mathbf{V}_i = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + a^2\mathbf{V}_S + a\mathbf{V}_T) =$$

$$= \frac{1}{3}\mathbf{V}_R(1 + a^2 + a) = 0 \qquad \ldots (3.34)$$

Dalje je struja nultog sistema iz izraza (2.18a) i (3.32)

$$\mathbf{I}_o = \frac{1}{3}(\mathbf{I}_R + \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T) = 0 \qquad \ldots (3.35)$$

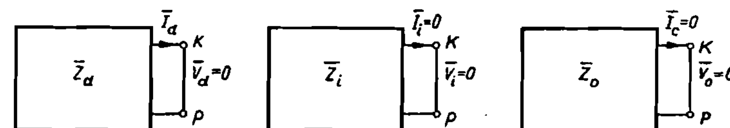
Konačno iz relacija (3.5) određujemo da je

$$\mathbf{I}_d = \frac{\mathbf{E}_d}{\mathbf{Z}_d} \qquad \ldots (3.36)$$

$$\mathbf{I}_i = 0 \qquad \ldots (3.37)$$

$$\mathbf{V}_o = 0 \qquad \ldots (3.38)$$

Prema tome samo kroz direktne reaktancije teče struja, koju tjera elektromotorna sila $\mathbf{E}_d$, dok su stezaljke K i P kratko spojene (sl. 3.20). Kroz inverzne i nulte reaktancije nema struja i pored toga što su njihove ste-



Slika 3.20. Prilike u slučaju tropolnog kratkog spoja (prikaz pojednostavnjenim ekvivalentnim shemama)

zaljke K i P kratko spojene, jer nema elektromotornih sila inverznog i nultog sistema.

Struje u pojedinim fazama određujemo pomoću relacija (2.16) i relacija (3.35), (3.36) i (3.37), pa dobivamo

$$\mathbf{I}_R = \mathbf{I}_d + \mathbf{I}_i + \mathbf{I}_o = \mathbf{I}_d \qquad \ldots (3.39a)$$

$$\mathbf{I}_S = a^2\,\mathbf{I}_d + a\,\mathbf{I}_i + \mathbf{I}_o = a^2\,\mathbf{I}_d \qquad \ldots (3.39b)$$

$$\mathbf{I}_T = a\mathbf{I}_d + a^2\,\mathbf{I}_i + \mathbf{I}_o = a\,\mathbf{I}_d \qquad \ldots (3.39c)$$

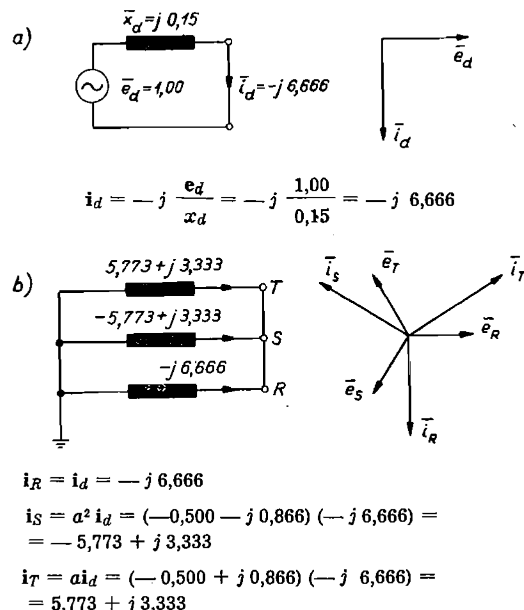
Napon u pojedinim tačkama ekvivalentnih shema možemo odrediti iz relacija koje su analogne izrazima (3.5).

Na sl. 3.21a prikazana je ekvivalentna shema generatora sa sl. 3.3, s označenom jediničnom strujom koju — analogno relaciji (3.36) — određujemo iz izraza (ako impedanciju zamijenimo reaktancijom)

$$\mathbf{i}_d = -j\,\frac{\mathbf{e}_d}{x_d} \qquad \ldots (3.40)$$

gdje je $\mathbf{e}_d$ jedinična elektromotorna sila, a x_d jedinična reaktancija direktnog sistema. Kako je već spomenuto, računamo da je jedinična elektromotorna sila

$$\mathbf{e}_d = 1{,}0 + j\,0 \qquad \ldots (3.41)$$



Slika 3.21. Struje tropolnog kratkog spoja na priključnicama generatora

Ako poznamo struju $\mathbf{i}_d$, i uzmemo u obzir da je $\mathbf{i}_i = 0$ (3.37) i $\mathbf{i}_o = 0$ (3.35), struje u fazama određujemo iz relacija (3.39), koje napisane jediničnim veličinama glase

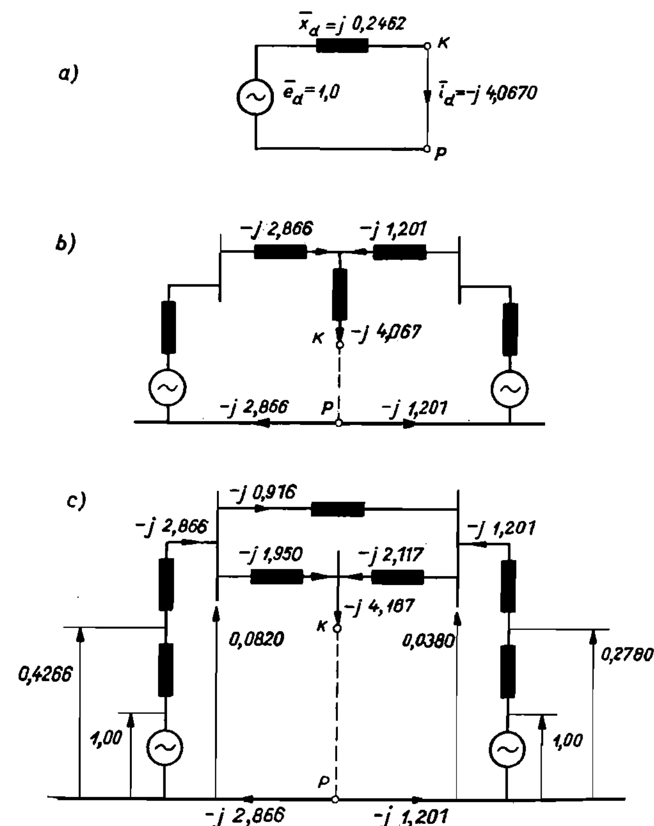
$$\mathbf{i}_R = \mathbf{i}_d \qquad \ldots (3.42a)$$

$$\mathbf{i}_S = a^2\,\mathbf{i}_d \qquad \ldots (3.42b)$$

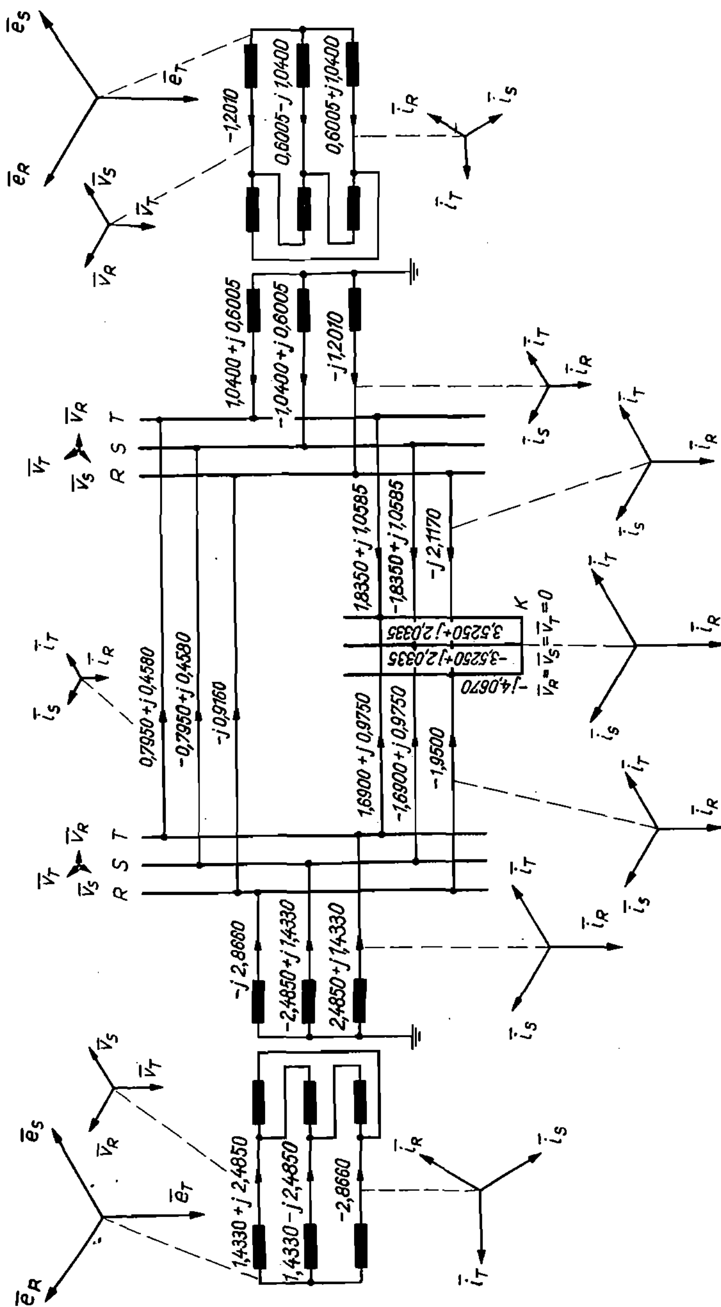
$$\mathbf{i}_T = a\,\mathbf{i}_d \qquad \ldots (3.42c)$$

Na sl. 3.21b u tropolnu shemu generatora unesene su jedinične vrijednosti struja, dok su u vektorskom dijagramu prikazane struje i elektromotorne sile.

Za mrežu prikazanu na sl. 3.4. postupano je ovako (sl. 3.22): najprije je određena struja $\mathbf{i}_d$ (3.40) na osnovu pojednostavnjene ekvivalentne sheme direktnog sistema (sl. 3.5c). Zatim je određeno razgranjavanje struja u shemi na sl. 3.5b (sl. 3.22b), te konačno razgranjavanje struja u



Slika 3.22. Raspodjela struja za slučaj tropolnog kratkog spoja u mreži prikazanoj na sl. 3.4.



Slika 3.23. Struje i naponi u mreži za slučaj tropolnog kratkog spoja u tački K.

kompletnoj ekvivalentnoj shemi (sl. 3.22c). Na sl. 3.22c navedeni su osim struja i naponi za pojedine karakteristične tačke mreže. Označene vrijednosti napona prikazuju razliku napona između promatrane tačke mreže i povratnog voda. Napon npr. na stezaljkama generatora G_1 (sl. 3.4) određujemo iz relacije

$$v_{dG_1} = e_d - i_{dG_1}\, x_{dG_1} \qquad \ldots (3.43)$$

gdje je i_{dG_1} struja koja teče kroz reaktanciju x_{dG_1} generatora. Do relacije (3.43) dolazimo iz (3.5a), koju u jediničnim vrijednostima možemo napisati

$$\mathbf{v}_{dG_1} = \mathbf{e}_d - (-j\, i_d)\,(j\, x_d) \qquad \ldots (3.44)$$

Analogno određujemo napone u svim tačkama mreže.

Da odredimo struje u fazama u svim dijelovima mreže, koristit ćemo relacije (3.42) u koje za $\mathbf{i}_d$ treba uvrstiti struju u promatranom dijelu mreže. Tako dobivene struje u fazama predstavljaju, naravno, jedinične fazne struje, pa da se dobiju stvarne struje, treba ih množiti sa I_{osn}, koje su za promatranu mrežu navedene u tablici na sl. 3.4. Prilikom određivanja struja i napona treba međutim uzeti u obzir zakretanje do kojeg dolazi zbog postojanja transformatora.

Na sl. 3.23 prikazana je promatrana mreža s naznačenim naponima i strujama. Struje koje daju generatori, odnosno struje na primarnim stranama transformatora, određene su prema relacijama (3.13), koje za tropolni kratki spoj glase

$$\mathbf{i}_R'' = -0{,}866\, \mathbf{i}_d + j\, 0{,}500\, \mathbf{i}_d \qquad \ldots (3.45a)$$

$$\mathbf{i}_S'' = 0{,}866\, \mathbf{i}_d + j\, 0{,}500\, \mathbf{i}_d \qquad \ldots (3.45b)$$

$$\mathbf{i}_T'' = -j\, \mathbf{i}_d \qquad \ldots (3.45c)$$

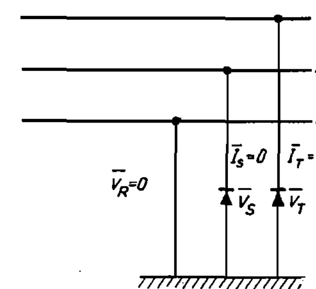
Naponi na primarnim priključnicama generatora određeni su prema (3.30), što za tropolni kratki spoj možemo napisati u obliku

$$\mathbf{e}_R'' = -0{,}866\, \mathbf{v}_d + j\, 0{,}500\, \mathbf{v}_d \qquad \ldots (3.46a)$$

$$\mathbf{e}_S'' = 0{,}866\, \mathbf{v}_d + j\, 0{,}500\, \mathbf{v}_d \qquad \ldots (3.46b)$$

$$\mathbf{e}_T'' = -j\, \mathbf{v}_d \qquad \ldots (3.46c)$$

Treba napomenuti, da relacije (3.13) i (3.30) vrijede za promatrani spoj transformatora. Za druge spojeve analogne relacije možemo odrediti na način prikazan u 3.2B.



Slika 3.24. Prikaz jednopolnog kratkog spoja

D. Jednopolni kratki spoj

Do jednopolnog kratkog spoja može doći samo u slučaju kad je nul-tačka uzemljena. Tada će na mjestu kvara nastati prilike prikazane na sl. 3.24. Jednopolni kratki spoj faze R karakteriziran je slijedećim odnosima

$$\mathbf{V}_R = 0 \qquad \ldots (3.47)$$

$$\mathbf{I}_S = 0 \qquad \ldots (3.48)$$

$$\mathbf{I}_T = 0 \qquad \ldots (3.49)$$

Struja u direktnom sistemu (2.18b) iznosi, dakle

$$\mathbf{I}_d = \frac{1}{3} (\mathbf{I}_R + a\, \mathbf{I}_S + a^2\, \mathbf{I}_T) = \frac{1}{3} \mathbf{I}_R \qquad \ldots (3.50a)$$

u inverznom sistemu (2.18c)

$$\mathbf{I}_i = \frac{1}{3} (\mathbf{I}_R + a^2\, \mathbf{I}_S + a\, \mathbf{I}_T) = \frac{1}{3} \mathbf{I}_R \qquad \ldots (3.50b)$$

dok je struja u nultom sistemu **(2.18a)**

$$\mathbf{I}_o = \frac{1}{3} (\mathbf{I}_R + \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T) = \frac{1}{3} \mathbf{I}_R \qquad \ldots (3.50c)$$

Prema tome je

$$\mathbf{I}_d = \mathbf{I}_i = \mathbf{I}_o = \frac{1}{3} \mathbf{I}_R \qquad \ldots (3.51)$$

Budući da je $\mathbf{V}_R = 0$, bit će (2.16a)

$$\mathbf{V}_d + \mathbf{V}_i + \mathbf{V}_o = 0 \qquad \ldots (3.52)$$

Iz (3.52) $\mathbf{V}_d = -\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_o$, pa je — prema (3.5a)

$$-\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_o = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\, \mathbf{Z}_d \qquad \ldots (3.53)$$

Uvrštavanjem vrijednosti za $\mathbf{V}_i$ i $\mathbf{V}_o$ iz (3.5b) i (3.5c) dobivamo

$$\mathbf{I}_i\, \mathbf{Z}_i + \mathbf{I}_o\, \mathbf{Z}_o = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\, \mathbf{Z}_d \qquad \ldots (3.54)$$

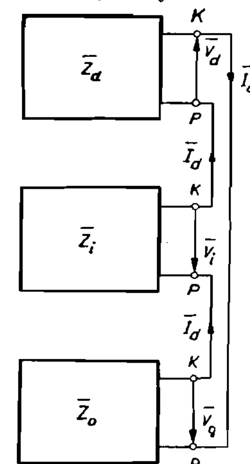
Konačno, uzmemo li u obzir (3.51), dolazimo do izraza za struju

$$\mathbf{I}_d = \frac{\mathbf{E}_d}{\mathbf{Z}_d + \mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o} \qquad \ldots (3.55)$$

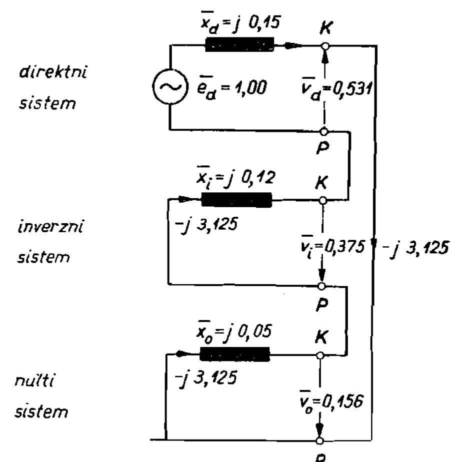
Prema (3.52) i (3.55) ekvivalentne sheme direktnog, inverznog i nultog sistema spojene su u seriju, kao na sl. 3.25, s tim da je K-priključnica direktnog sistema spojena na P-priključnicu nultog sistema (ili inverznog sistema), a K-priključnica nultog sistema (ili inverznog sistema) spojena na P-priključnicu inverznog sistema (ili nultog sistema). Taj redoslijed spajanja potreban je da bi se zadovoljila relacija (3.52).

Koristeći relaciju (3.16a) određujemo struju u fazi R

$$\mathbf{I}_R = \mathbf{I}_d + \mathbf{I}_i + \mathbf{I}_o = 3\, \mathbf{I}_d = \frac{3\, \mathbf{E}_d}{\mathbf{Z}_d + \mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o} \qquad \ldots (3.55a)$$



Slika 3.25. Prilike za slučaj jednopolnog kratkog spoja (prikaz pojednostavnjenim ekvivalentnim shemama)



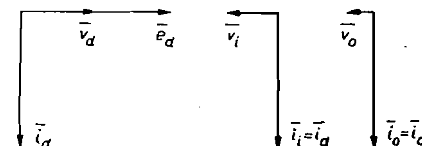
$$\mathbf{i}_d = -j \frac{\mathbf{e}_d}{x_d + x_i + x_o} =$$

$$= -j \frac{1{,}00}{0{,}15 + 0{,}12 + 0{,}05} = -j\ 3{,}125$$

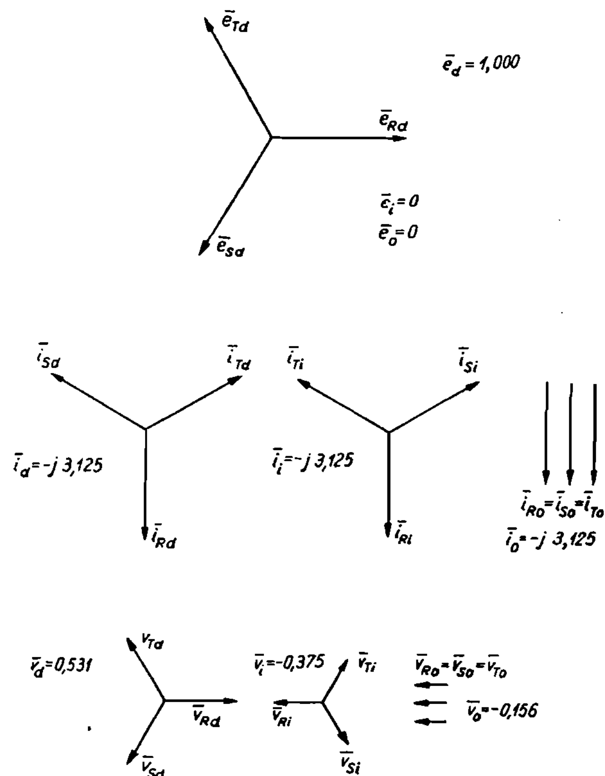
$$\mathbf{v}_d = \mathbf{e}_d - \mathbf{i}_d\, \mathbf{x}_d = 1{,}000 -$$
$$- 3{,}125 \cdot 0{,}15 = 0{,}531$$

$$\mathbf{v}_i = -\mathbf{i}_i\, \mathbf{x}_i = -3{,}125 \cdot 0{,}12 =$$
$$= -0{,}375$$

$$\mathbf{v}_o = -\mathbf{i}_o\, \mathbf{x}_o = -3{,}125 \cdot 0{,}05 =$$
$$= -0{,}156$$



Slika 3.26. Struje i naponi jednopolnog kratkog spoja na priključnicama generatora (prilike u ekvivalentnim shemama)



Slika 3.27. Simetrične komponente elektromotorne sile, struje i napona za jednopolni kratki spoj na priključnicama generatora

dok su struje u ostalim fazama na mjestu kratkog spoja jednake nuli, što vrijedi samo na mjestu kvara, jer polazne pretpostavke vrijede za mjesto kvara.

Ako impedancije zamijenimo reaktancijama i preračunamo na jedinične vrijednosti, relaciju (3.55) možemo napisati

$$\mathbf{i}_d = -j \frac{\mathbf{e}_d}{x_d + x_i + x_o} \qquad \ldots (3.56)$$

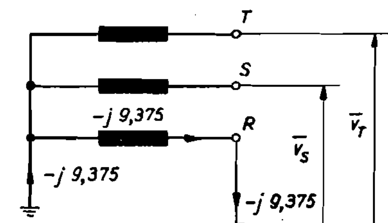
Jedinične vrijednosti napona između stezaljki K i P određujemo — prema (3.5) — iz relacija

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{e}_d - j\,\mathbf{i}_d\, x_d \qquad \ldots (3.57a)$$

$$\mathbf{v}_i = -j\,\mathbf{i}_d\, x_i \qquad \ldots (3.57b)$$

$$\mathbf{v}_o = -j\,\mathbf{i}_d\, x_o \qquad \ldots (3.57c)$$

gdje je već uzet u obzir izraz (3.51), dok napone u pojedinim tačkama mreže određujemo iz relacija analognih izrazima (3.57). Tada u (3.57) treba uvrstiti struje i reaktancije u pojedinim dijelovima mreže.



$$\mathbf{i}_R = \mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o = 3\,\mathbf{i}_d = -j\,3 \cdot 3,125 = -j\,9,375$$

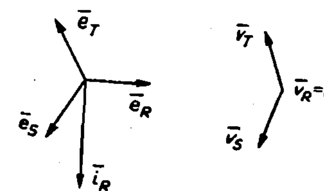
$$\mathbf{i}_S = a^2\,\mathbf{i}_d + a\mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o = \mathbf{i}_d\,(a^2 + a + 1) = 0$$

$$\mathbf{i}_T = a\mathbf{i}_d + a^2\,\mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o = \mathbf{i}_d\,(a + a^2 + 1) = 0$$

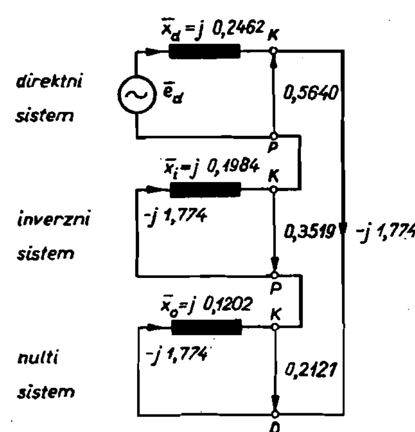
$$\mathbf{v}_R = \mathbf{v}_d - \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_o = 0$$

$$\mathbf{v}_S = -0,156 - 0,500\,(0,531 - 0,375) - -j\,0,866\,(0,531 + 0,375) = 0,234 - j\,0,784$$

$$\mathbf{v}_T = -0,234 + j\,0,784$$



Slika 3.28. Struje i naponi jednopolnog kratkog spoja na priključnicama generatora



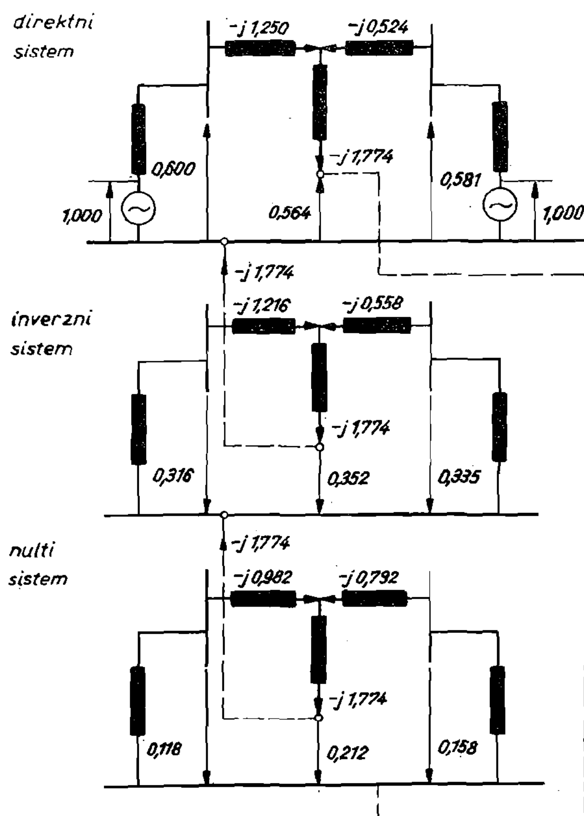
$$\mathbf{i}_d = \mathbf{i}_i = \mathbf{i}_o = -j \frac{\mathbf{e}_d}{x_d + x_i + x_o} = -j \frac{1,000}{0,5648} = -j\,1,774$$

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{e}_d - \mathbf{i}_d\,\mathbf{x}_d = 1.000 - -1,774 \cdot 0,2462 = 0,5640$$

$$\mathbf{v}_i = -\mathbf{i}_i\mathbf{x}_i = -\mathbf{i}_d\mathbf{x}_d = -1,774 \cdot 0,1984 = -0,3519$$

$$\mathbf{v}_o = -\mathbf{i}_o\mathbf{x}_o = -\mathbf{i}_d\mathbf{x}_o = -1,774 \cdot 0,1202 = -0,2121$$

Slika 3.29. Struje i naponi za jednopolni kratki spoj u ekvivalentnim shemama na sl. 3.5. (pojednostavnjene ekvivalentne sheme)

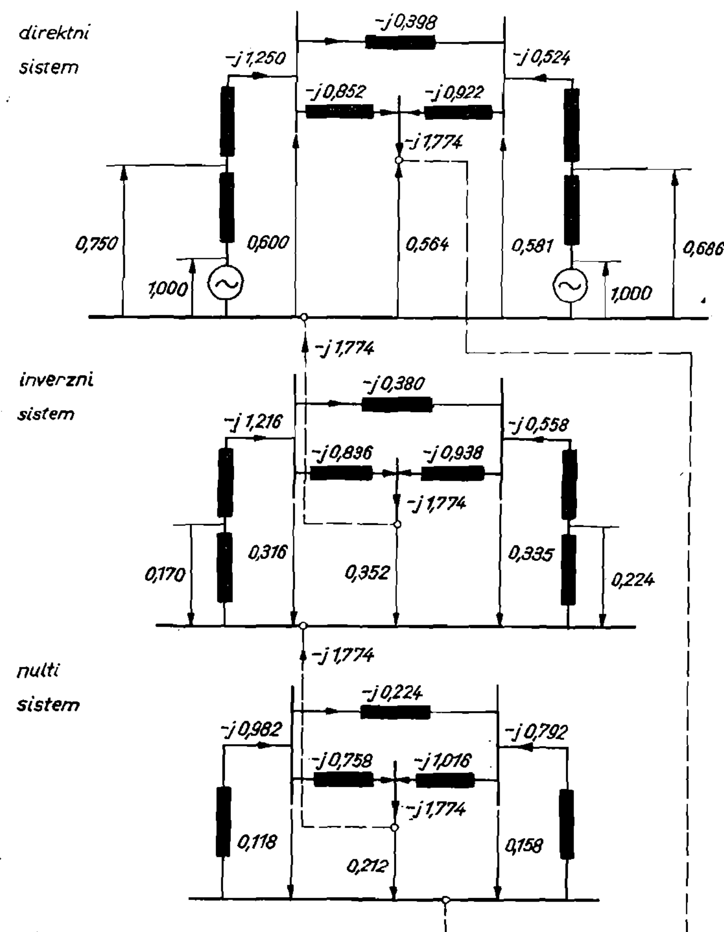


Slika 3.30. Struje i naponi za jednopolni kratki spoj u ekvivalentnim shemama mreže na sl. 3.5. (transfigurirane ekvivalentne sheme)

Na sl. 3.26 prikazane su ekvivalentne sheme za jednopolni kratki spoj na priključnicama generatora (sl. 3.4) s označenim strujama i naponima, dok su na sl. 3.29, 3.30 i 3.31 prikazane ekvivalentne sheme (od pojednostavnjenih do kompletnih shema) za promatranu mrežu (sl. 3.5).

Podaci o strujama i naponima u ekvivalentnim shemama služe za određivanje faznih struja i faznih napona. Ovdje treba naglasiti da izrazi za fazne napone i struje, od kojih se pošlo pri određivanju prilika za slučaj jednopolnog kratkog spoja, vrijede samo za mjesto kvara, ali ne vrijede za ostale tačke u mreži. Struje i napone u ostalim dijelovima mreže treba međutim odrediti pomoću struja i napona u ekvivalentnim shemama.

Prema (2.16), za jedinične vrijednosti struja u fazama možemo napisati



Slika 3.31. Struje i naponi za jednopolni kratki spoj u ekvivalentnim shemama mreže na sl. 3.5. (kompletne ekvivalentne sheme)

$$\mathbf{i}_R = \mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o \qquad \ldots (3.58a)$$

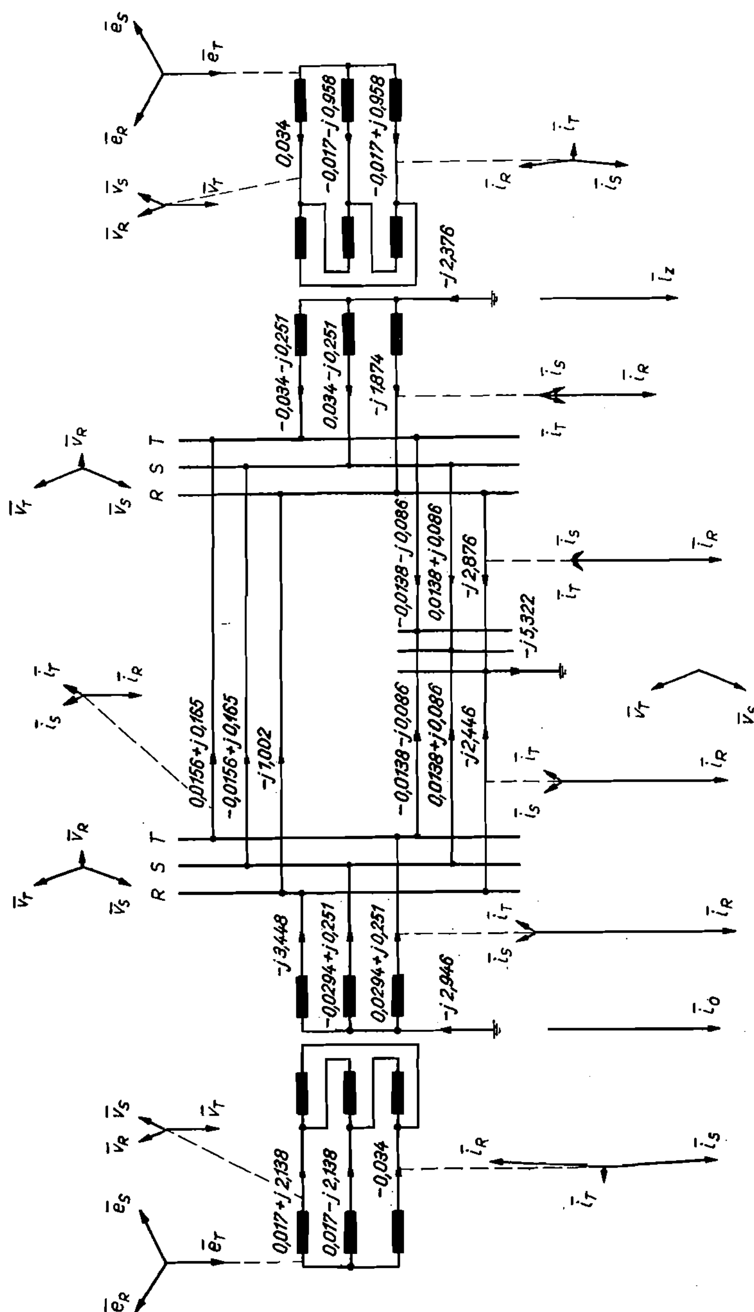
$$\mathbf{i}_S = a^2\, \mathbf{i}_d + a\mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o \qquad \ldots (3.58b)$$

$$\mathbf{i}_T = a\, \mathbf{i}_d + a^2\, \mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o \qquad \ldots (3.58c)$$

gdje su $\mathbf{i}_d$, $\mathbf{i}_i$ i $\mathbf{i}_o$ jedinične struje u promatranom dijelu mreže. Uzmemo li u obzir (2.4) i (2.5), za struje u fazi S i T dobivamo

$$\mathbf{i}_S = \mathbf{i}_o - 0{,}500\, (\mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i) - j\, 0{,}866\, (\mathbf{i}_d - \mathbf{i}_i) \qquad (3.59a)$$

$$\mathbf{i}_T = \mathbf{i}_o - 0{,}500\, (\mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i) + j\, 0{,}866\, (\mathbf{i}_d - \mathbf{i}_i) \qquad (3.59b)$$



Slika 3.32. Struje i naponi u mreži za slučaj jednopolnog kratkog spoja u tački K

Pri određivanju faznih napona polazimo također od izraza analognih relacijama (2.16)

$$\mathbf{v}_R = \mathbf{v}_d + \mathbf{v}_i + \mathbf{v}_o \qquad \ldots (3.60a)$$

$$\mathbf{v}_S = a^2\,\mathbf{v}_d + a\,\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_o \qquad \ldots (3.60b)$$

$$\mathbf{v}_T = a\,\mathbf{v}_d + a^2\,\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_o \qquad \ldots (3.60c)$$

Analogno izrazima za struju možemo napisati

$$\mathbf{v}_S = \mathbf{v}_o - 0{,}500\,(\mathbf{v}_d + \mathbf{v}_i) - j\,0{,}866\,(\mathbf{v}_d - \mathbf{v}_i) \qquad \ldots (3.61a)$$

$$\mathbf{v}_T = \mathbf{v}_o - 0{,}500\,(\mathbf{v}_d + \mathbf{v}_i) + j\,0{,}866\,(\mathbf{v}_d - \mathbf{v}_i) \qquad \ldots (3.61b)$$

Na sl. 3.27 prikazane su simetrične komponente elektromotornih sila generatora (sl. 3.26), struja i napona na priključnicama generatora, dok su na sl. 3.28 prikazane fazne struje i fazni naponi istog generatora za jednopolni kratki spoj na priključnicama.

Na sl. 3.32 prikazane su struje i naponi u promatranoj mreži. Treba napomenuti da su smjerovi struje, označeni na shemi, tako odabrani kao da sve struje teku prema mjestu kvara.

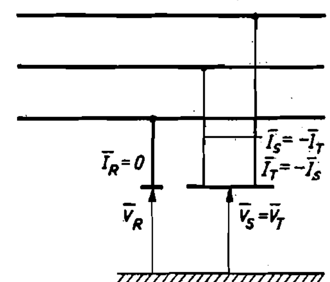
E. Dvopolni kratki spoj

Dvopolni kratki spoj prikazan je shemom na sl. 3.33. Za takvu vrst kvara vrijede odnosi

$$\mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T = 0 \qquad \ldots (3.62)$$

$$\mathbf{I}_R = 0 \qquad \ldots (3.63)$$

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{V}_T \qquad \ldots (3.64)$$



Slika 3.33. Prikaz dvopolnog kratkog spoja

Za struju u direktnom sistemu tada dobivamo (2.18b)

$$\mathbf{I}_d = \frac{1}{3}\,(\mathbf{I}_R + a\,\mathbf{I}_S + a^2\,\mathbf{I}_T) = \frac{1}{3}\,\mathbf{I}_S\,(a - a^2) \qquad \ldots (3.65a)$$

u inverznom sistemu (2.18c)

$$\mathbf{I}_i = \frac{1}{3}\,(\mathbf{I}_R + a^2\,\mathbf{I}_S + a\,\mathbf{I}_T) = \frac{1}{3}\,\mathbf{I}_S\,(a^2 - a) \qquad \ldots (3.65b)$$

a u nultom sistemu (2.18a)

$$\mathbf{I}_o = \frac{1}{3}(\mathbf{I}_R + \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T) = 0 \qquad \ldots (3.65c)$$

Iz (3.65a) i (3.65b) imamo

$$\mathbf{I}_d = -\mathbf{I}_i \qquad \ldots (3.66)$$

Za komponente napona možemo postaviti

$$\mathbf{V}_d = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + a\,\mathbf{V}_S + a^2\,\mathbf{V}_T) = \frac{1}{3}[\mathbf{V}_R + \mathbf{V}_S(a + a^2)] \quad \ldots (3.67a)$$

$$\mathbf{V}_i = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + a^2\,\mathbf{V}_S + a\,\mathbf{V}_T) = \frac{1}{3}[\mathbf{V}_R + \mathbf{V}_S(a^2 + a)] \quad \ldots (3.67b)$$

pa je

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{V}_i \qquad \ldots (3.68)$$

Budući da je $\mathbf{I}_o = 0$, mora — prema (3.5c) — biti i

$$\mathbf{V}_o = 0 \qquad \ldots (3.67c)$$

Prema tome (3.5a) i (3.5b) možemo napisati u obliku

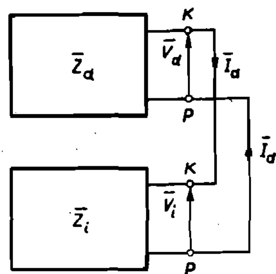
$$\mathbf{V}_d = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_d \qquad \ldots (3.68a)$$

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_i \qquad \ldots (3.68b)$$

pa je

$$\mathbf{I}_d = \frac{\mathbf{E}_d}{\mathbf{Z}_d + \mathbf{Z}_i} \qquad \ldots (3.69)$$

Ekvivalentna shema inverznog sistema spojena je dakle u seriju s ekvivalentnom shemom direktnog sistema (sl. 3.34), i to tako da se priključnice K spoje međusobno, kako bi se osiguralo ispunjenje uvjeta (3.66) i (3.69). Ekvivalentna shema nultog sistema ne utječe na prilike u mreži.



Slika 3.34. Prilike u slučaju dvopolnog kratkog spoja (prikaz pojednostavnjenim ekvivalentnim shemama)

Uzmemo li u obzir relacije (3.16), dobit ćemo za struje u fazama

$$\mathbf{I}_S = \mathbf{I}_d(a^2 - a) = \frac{\mathbf{E}_d(a^2 - a)}{\mathbf{Z}_d + \mathbf{Z}_i} \qquad \ldots (3.70a)$$

$$\mathbf{I}_T = \mathbf{I}_d(a - a^2) = \frac{\mathbf{E}_d(a - a^2)}{\mathbf{Z}_d + \mathbf{Z}_i} \qquad \ldots (3.70b)$$

dok je $\mathbf{I}_R = 0$ na mjestu kratkog spoja.

Upotrebom jediničnih vrijednosti dobivamo za struju na mjestu kvara, kad zanemarimo djelatne otpore,

$$\mathbf{i}_d = -j\frac{\mathbf{e}_d}{x_d + x_i} = -\mathbf{i}_i \qquad \ldots (3.71)$$

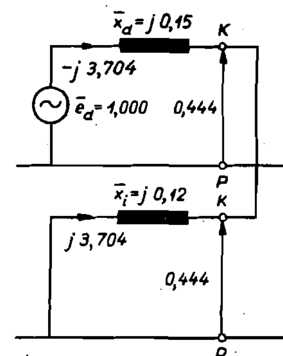
dok za napone u bilo kojoj tački mreže možemo postaviti

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{e}_d - j\,\mathbf{i}_d\,x_d \qquad \ldots (3.72a)$$

$$\mathbf{v}_i = -j\,\mathbf{i}_i\,x_i \qquad \ldots (3.72b)$$

jer se u pojedinim dijelovima mreže struja $\mathbf{i}_d$ razlikuje od struje $-\mathbf{i}_i$.

Na sl. 3.35. prikazane su ekvivalentne sheme generatora (sl. 3.3), sa strujama i naponima u njima. Prilikom unošenja oznaka smjera struje proveden je princip da su te oznake uvijek takve kao da struje teku prema mjestu kvara. Radi toga je u ekvivalentnoj shemi inverznog sistema izmijenjen predznak struje. S tako izmijenjenim predznakom treba pro-

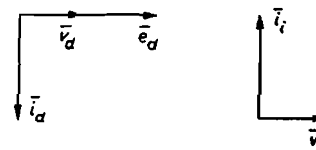


$$\mathbf{i}_d = -j\frac{\mathbf{e}_d}{x_d + x_i} = -j\frac{1{,}000}{0{,}150 + 0{,}120} = -j\,3{,}704$$

$$\mathbf{i}_i = -\mathbf{i}_d = j\,3{,}704$$

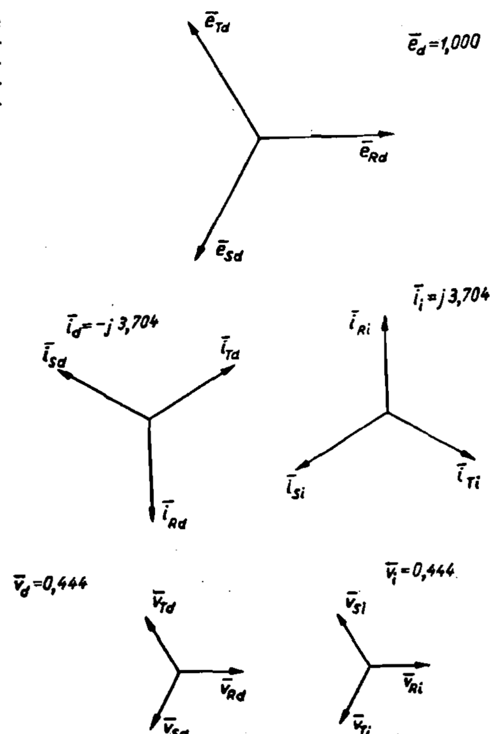
$$\mathbf{v}_d = \mathbf{e}_d - \mathbf{i}_d\,\mathbf{x}_d = 1{,}000 - 3{,}704 \cdot 0{,}15 = 0{,}444$$

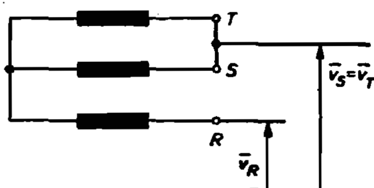
$$\mathbf{v}_i = -\mathbf{i}_i\,\mathbf{x}_i = \mathbf{i}_d\mathbf{x}_i = 3{,}704 \cdot 0{,}12 = 0{,}444$$



Slika 3.35. Struje i naponi dvopolnog kratkog spoja na priključnicama generatora (prikaz u ekvivaletnim shemama)

Slika 3.36. Simetrične komponente elektromotorne sile, struja i napona i naponi za dvopolni kratki spoj na priključnicama generatora





$$\mathbf{i}_R = \mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o = 0$$

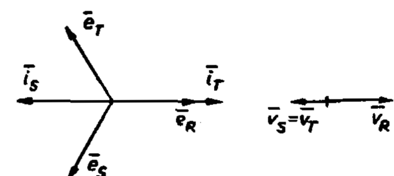
$$\mathbf{i}_S = a^2\mathbf{i}_d + a\,\mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o = \mathbf{i}_d\,(a^2 - a) = -j\sqrt{3}\,\mathbf{i}_d = -6{,}420$$

$$\mathbf{i}_T = a\,\mathbf{i}_d + a^2\,\mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o = \mathbf{i}_d\,(a - a^2) = j\sqrt{3}\,\mathbf{i}_d = 6{,}420$$

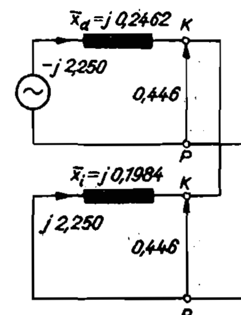
$$\mathbf{v}_R = \mathbf{v}_d + \mathbf{v}_i + \mathbf{v}_o = 0{,}888$$

$$\mathbf{v}_S = a^2\mathbf{v}_d + a\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_o = \mathbf{v}_d\,(a^2 + a) = -\mathbf{v}_d = -0{,}444$$

$$\mathbf{v}_T = a\,\mathbf{v}_d + a^2\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_o = \mathbf{v}_d\,(a + a^2) = -\mathbf{v}_d = -0{,}444$$



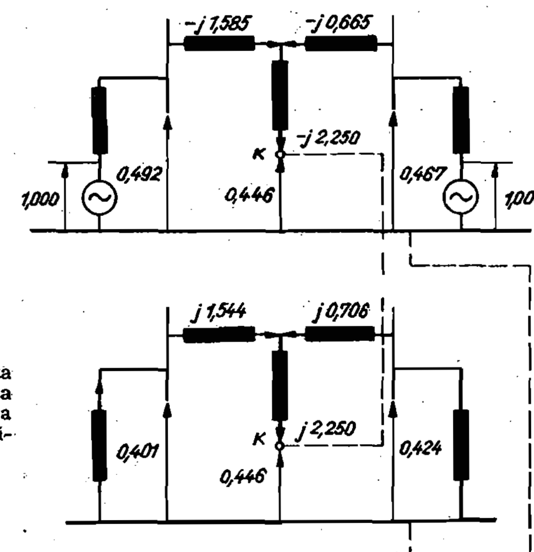
Slika 3.37. Struje i naponi za slučaj dvopolnog kratkog spoja na stezaljkama generatora



$$\mathbf{i}_d = -j\,\frac{1{,}000}{0{,}2462 + 0{,}1984} = -j\;2{,}250$$

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{e}_d - \mathbf{i}_d\,\mathbf{x}_d = 1{,}000 - 2{,}250 \cdot 0{,}2462 = 0{,}446$$

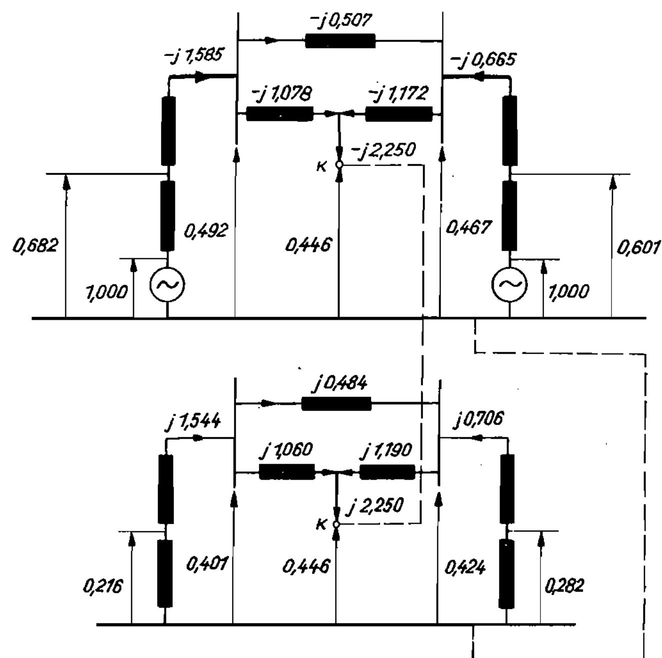
Slika 3.38. Struje i naponi za slučaj dvopolnog kratkog spoja u ekvivalentnim shemama mreže na sl. 3.5. (pojednostavnjene ekvivalentne sheme)



Slika 3.39. Struje i naponi za slučaj dvopolnog kratkog spoja u ekvivalentnim shemama mreže na sl. 3.5 (transfigurirane ekvivalentne sheme)

vesti daljnji račun. Iz struja i napona na sl. 3.35 dolazimo do simetričnih komponenata (sl. 3.36) prema (3.8) i do struja (3.58a, 3.59) i napona (3.60a i 3.61) u pojedinim fazama (sl. 3.37).

Na sl. 3.38 do 3.40 prikazane su ekvivalentne sheme mreže sa sl. 3.5, s naznačenim strujama i naponima, dok su na sl. 3.41 prikazane struje i naponi u fazama. Pri određivanju struja i napona na strani trokuta upotrebljene su relacije (3.13) i (3.30).

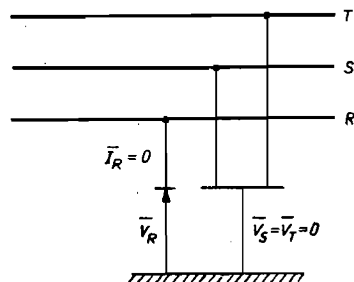


Slika 3.40. Struje i naponi za slučaj dvopolnog kratkog spoja u ekvivalentnim shemama mreže na sl. 3.5 (kompletne ekvivalentne sheme)

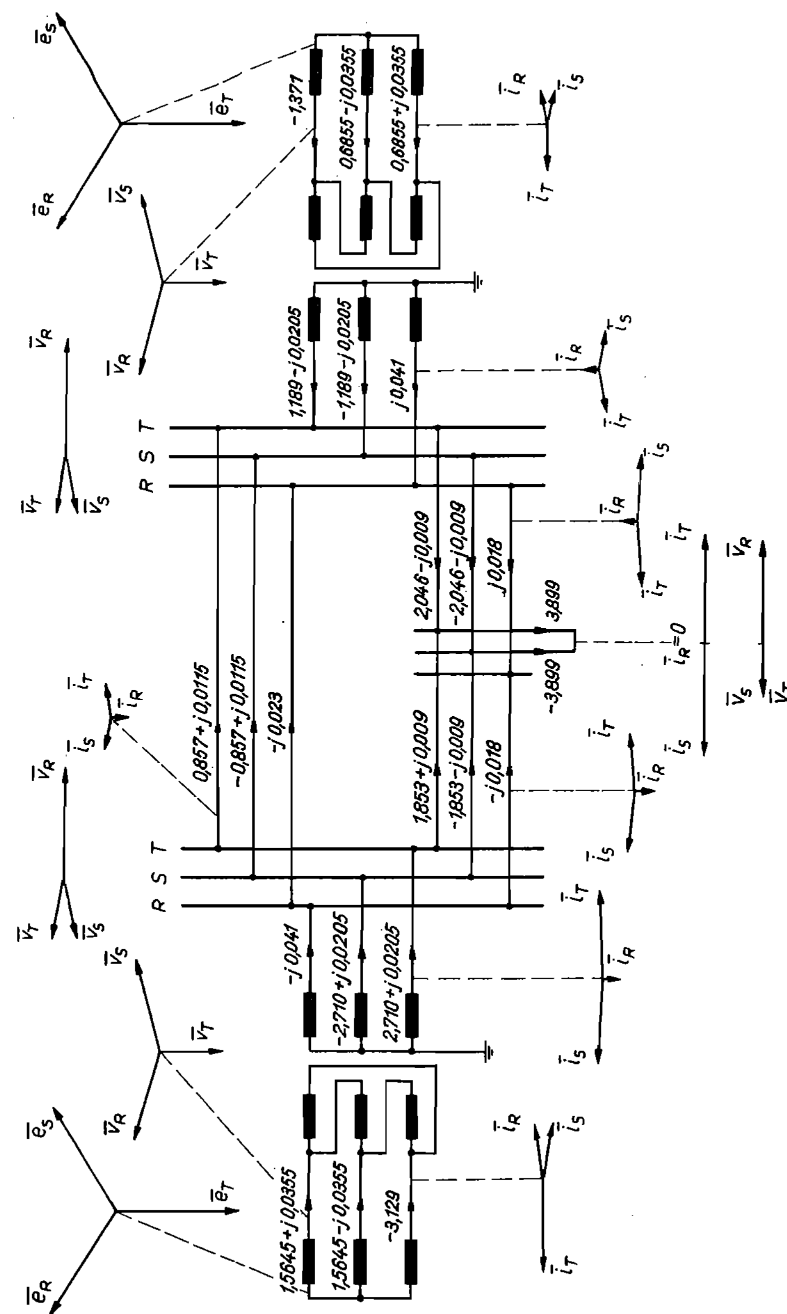
F. Dvopolni kratki spoj s istovremenim spojem sa zemljom

Kao i za jednopolni kratki spoj, dvopolni s istovremenim spojem sa zemljom poprima opisano značenje samo u slučaju kad je nul-tačka mreže uzemljena.

Prilike u slučaju dvopolnog kratkog spoja s istodobnim spojem sa zemljom prikazane su na sl. 3.42, a karakterizirane ovim relacijama



Slika 3.42. Prikaz dvopolnog kratkog spoja s istovremenim spojem sa zemljom



Slika 3.41. Struje i naponi u mreži za slučaj dvopolnog kratkog spoja

$$\mathbf{I}_R = 0 \qquad \ldots (3.73)$$

$$\mathbf{V}_S = 0 \qquad \ldots (3.74)$$

$$\mathbf{V}_T = 0 \qquad \ldots (3.75)$$

Iz izraza za fazu R dobivamo

$$\mathbf{I}_R = \mathbf{I}_d + \mathbf{I}_i + \mathbf{I}_o = 0 \qquad \ldots (3.76)$$

što znači da je zbroj komponenata struja jednak nuli. Koristeći uvjete (3.74) i (3.75) dobivamo za komponente napona

$$\mathbf{V}_d = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + a\mathbf{V}_S + a^2\mathbf{V}_T) = \frac{1}{3}\mathbf{V}_R \qquad \ldots (3.77a)$$

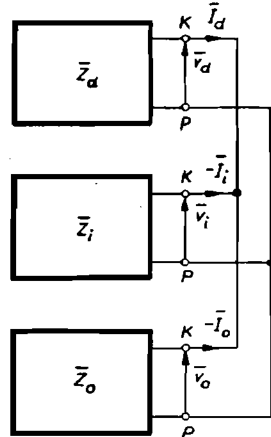
$$\mathbf{V}_i = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + a^2\mathbf{V}_S + a\mathbf{V}_T) = \frac{1}{3}\mathbf{V}_R \qquad \ldots (3.77b)$$

$$\mathbf{V}_o = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + \mathbf{V}_S + \mathbf{V}_T) = \frac{1}{3}\mathbf{V}_R \qquad \ldots (3.77c)$$

Prema tome je

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{V}_i = \mathbf{V}_o \qquad \ldots (3.78)$$

Iz uvjeta (3.76) i (3.78) dolazimo do međusobnog spoja ekvivalentnih shema kao na sl. 3.43. Prema tome ekvivalentne sheme inverznog i nultog sistema međusobno su spojene paralelno i tako paralelno spojene



Slika 3.43. Prilike za slučaj dvopolnog kratkog spoja uz istovremeni spoj sa zemljom (prikaz pojednostavnjenim ekvivalentnim shemama)

vezane su u seriju s ekvivalentnom shemom direktnog sistema.

Da odredimo struju u direktnom sistemu pođimo od relacija (3.5) koje, uzevši u obzir (3.76) i (3.78), možemo napisati

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\mathbf{Z}_d \qquad \ldots (3.79a)$$

$$\mathbf{V}_d = (\mathbf{I}_d + \mathbf{I}_o)\mathbf{Z}_i \qquad \ldots (3.79b)$$

$$\mathbf{V}_d = -\mathbf{I}_o\mathbf{Z}_o \qquad \ldots (3.79c)$$

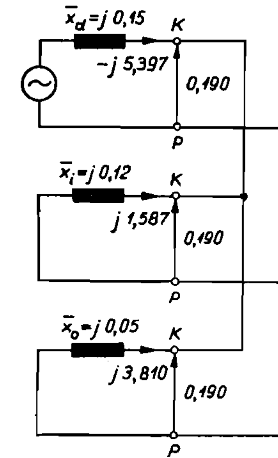
Ako sada iz treće jednadžbe odredimo $\mathbf{I}_o$ i uvrstimo ga u drugu, pa iz prve i druge jednadžbe odredimo $\mathbf{I}_d$, dobit ćemo

$$\mathbf{I}_d = \frac{\mathbf{E}_d}{\mathbf{Z}_d + \dfrac{\mathbf{Z}_i\mathbf{Z}_o}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}} = \mathbf{E}_d\frac{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}{\mathbf{Z}_d\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_d\mathbf{Z}_o + \mathbf{Z}_i\mathbf{Z}_o} \qquad \ldots (3.80a)$$

Do izraza (3.80a) dolazi se i pomoću relacija (3.5), (3.76) i (3.78).

Iz relacija (3.79) i (3.80a) određujemo struje u inverznom i nultom sistemu, pa je

$$\mathbf{I}_i = -\mathbf{E}_d\frac{\mathbf{Z}_o}{\mathbf{Z}_d\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_d\mathbf{Z}_o + \mathbf{Z}_i\mathbf{Z}_o} \qquad \ldots (3.80b)$$



$$\mathbf{i}_d = -j\,\mathbf{e}_d\frac{x_i + x_o}{x_d x_i + x_d x_o + x_i x_o} =$$

$$= -j\,1,00\frac{0,12 + 0,05}{0,15 \cdot 0,12 + 0,15 \cdot 0,05 + 0,12 \cdot 0,05} =$$

$$= -j\,1,00\frac{0,17}{0,0315} = -j\,5,397$$

$$\mathbf{i}_i = j\,\mathbf{e}_d\frac{x_o}{x_d x_i + x_d x_o + x_i x_o} =$$

$$= j\,1,00\frac{0,05}{0,0315} = j\,1,587$$

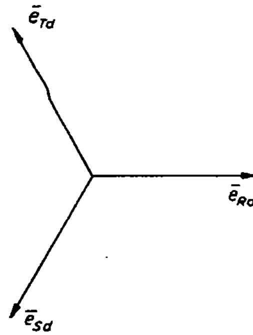
$$\mathbf{i}_o = j\,\mathbf{e}_d\frac{x_i}{x_d x_i + x_d x_o + x_i x_o} =$$

$$= j\,1,00\frac{0,12}{0,0315} = j\,3,810$$

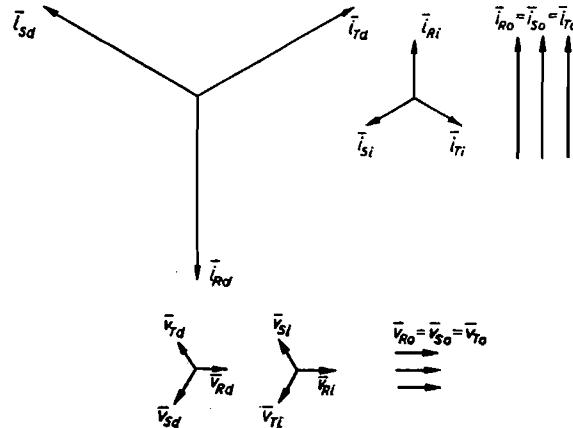
$$\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_i = \mathbf{v}_o = \mathbf{e}_d\frac{x_i x_o}{x_d x_i + x_d x_o + x_i x_o} =$$

$$= 1,00\frac{0,0060}{0,0315} = 0,190$$

Slika 3.44. Struje i naponi za slučaj dvopolnog kratkog spoja s istovremenim spojem sa zemljom na priključnicama generatora (prikaz u ekvivalentnim shemama)



Slika 3.45. Simetrične komponente elektromotorne sile, struja i napona za dvopolni kratki spoj s istovremenim spojem sa zemljom na priključnicama generatora



$$\mathbf{I}_o = -\mathbf{E}_d \frac{\mathbf{Z}_i}{\mathbf{Z}_d\,\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_d\,\mathbf{Z}_o + \mathbf{Z}_i\,\mathbf{Z}_o} \qquad \dots (3.80c)$$

dok pomoću relacije (3.39) i (3.80) određujemo struje u pojedinim fazama

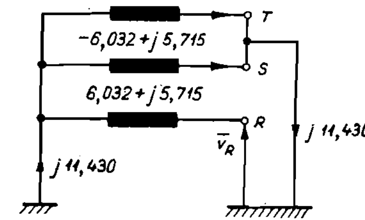
$$\mathbf{I}_R = 0 \qquad \dots (3.81a)$$

$$\mathbf{I}_S = \mathbf{E}_d \frac{\mathbf{Z}_i\,(a^2 - 1) + \mathbf{Z}_o\,(a^2 - a)}{\mathbf{Z}_d\,\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_d\,\mathbf{Z}_o + \mathbf{Z}_i\,\mathbf{Z}_o} \qquad \dots (3.81b)$$

$$\mathbf{I}_T = \mathbf{E}_d \frac{\mathbf{Z}_i\,(a - 1) + \mathbf{Z}_o\,(a - a^2)}{\mathbf{Z}_d\,\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_d\,\mathbf{Z}_o + \mathbf{Z}_i\,\mathbf{Z}_o} \qquad \dots (3.81c)$$

Upotrijebimo li jedinične vrijednosti i ako zanemarimo djelatne otpore za (3.80), možemo napisati

$$\mathbf{i}_d = -j\,\frac{\mathbf{e}_d}{x_d + \dfrac{x_i\,x_o}{x_i + x_o}} = -j\,\mathbf{e}_d \frac{x_i + x_o}{x_d\,x_i + x_d\,x_o + x_i\,x_o} \qquad (3.81d)$$



$$\mathbf{i}_R = \mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o = 0$$

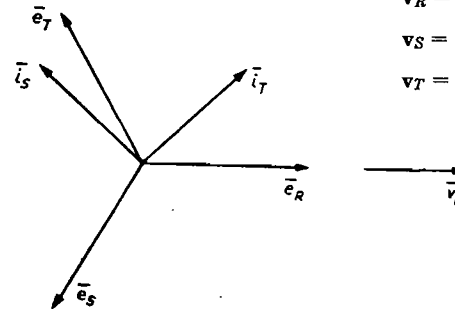
$$\mathbf{i}_S = a^2\,\mathbf{i}_d + a\mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o = (a^2 - 1)\,\mathbf{i}_d + (a - 1)\,\mathbf{i}_i = -1{,}500\;(\mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i) - j\,0{,}866\;(\mathbf{i}_d - \mathbf{i}_i) = -6{,}032 + j\,5{,}715$$

$$\mathbf{i}_T = a\mathbf{i}_d + a^2\,\mathbf{i}_i + \mathbf{i}_o = (a - 1)\,\mathbf{i}_d + (a^2 - 1)\,\mathbf{i}_i = -1{,}500\;(\mathbf{i}_d + \mathbf{i}_i) + j\,0{,}866\;(\mathbf{i}_d - \mathbf{i}_i) = 6{,}032 + j\,5{,}715$$

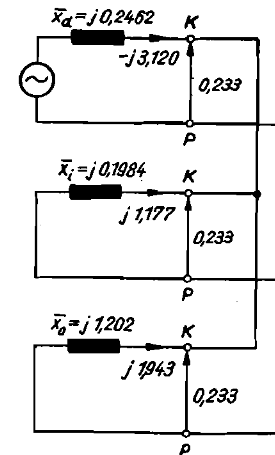
$$\mathbf{v}_R = \mathbf{v}_d + \mathbf{v}_i + \mathbf{v}_o = 0{,}570$$

$$\mathbf{v}_S = a^2\mathbf{v}_d + a\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_o = 0$$

$$\mathbf{v}_T = a\mathbf{v}_d + a^2\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_o = 0$$



Slika 3.46. Struje i napon kod dvopolnog kratkog spoja s istodobnim spojem sa zemljom na stezaljkama generatora



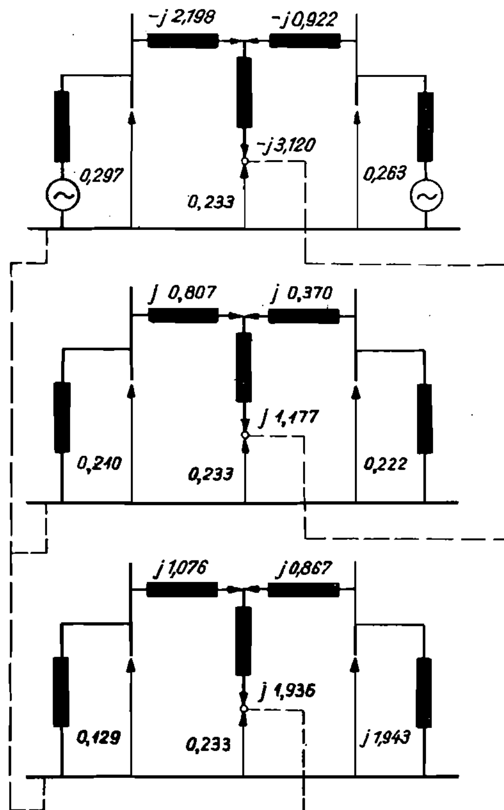
$$\mathbf{i}_d = -\mathbf{j}\,\mathbf{e}_d \frac{x_i + x_o}{x_d x_i + x_d x_o + x_i x_o} = -\mathbf{j}\;1{,}00\,\frac{0{,}3186}{0{,}1022} = -j\;3{,}120$$

$$\mathbf{i}_i = \mathbf{j}\,\mathbf{e}_d \frac{x_o}{x_d x_i + x_d x_o + x_i x_o} = j\;1{,}00\,\frac{0{,}1202}{0{,}1022} = j\;1{,}177$$

$$\mathbf{i}_o = j\,\mathbf{e}_d \frac{x_i}{x_d x_i + x_d x_o + x_i x_o} = j\;1{,}00\,\frac{0{,}1984}{0{,}1022} = j\;1{,}943$$

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_i = \mathbf{v}_o = \mathbf{e}_d \frac{x_i x_o}{x_d x_i + x_d x_o + x_i x_o} = 1{,}00\,\frac{0{,}0238}{0{,}1022} = 0{,}233$$

Slika 3.47. Struje i naponi dvopolnog kratkog spoja uz istovremeni spoj sa zemljom u ekvivalentnim shemama mreže na sl. 3.5. (pojednostavnjene ekvivalentne sheme)



Slika 3.48. Struje i naponi dvopolnog kratkog spoja s istodobnim spojem sa zemljom u ekvivalentnim shemama mreže na sl. 3.5. (transfigurirane ekvivalentne sheme)

dok za struje u inverznom i nultom sistemu dobivamo

$$\mathbf{i}_i = j\,\mathbf{e}_d \frac{x_o}{x_d\, x_i + x_d\, x_o + x_i\, x_o} \qquad \ldots (3.81e)$$

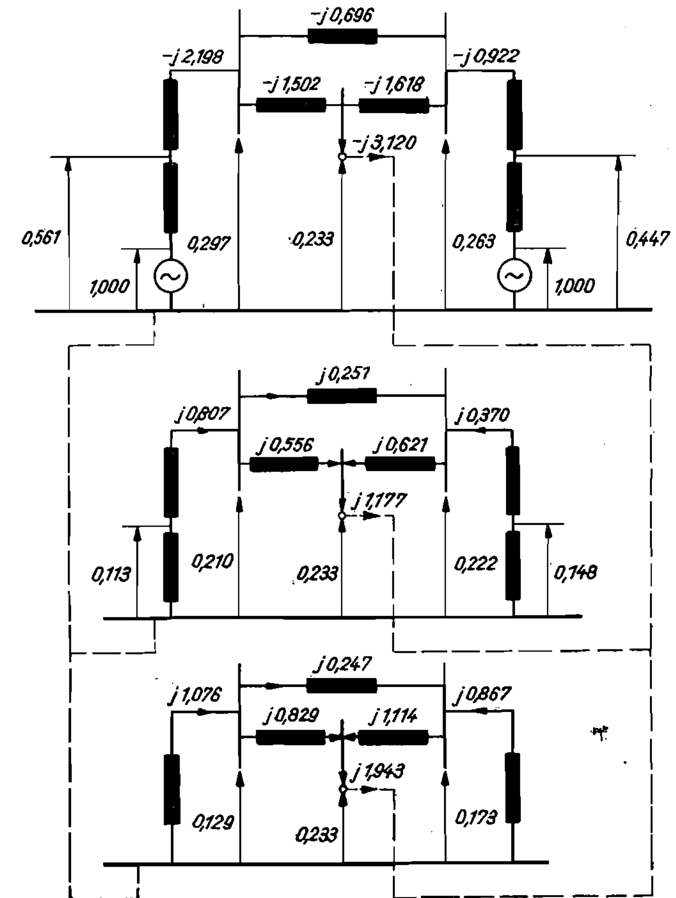
$$\mathbf{i}_o = j\,\mathbf{e}_d \frac{x_i}{x_d\, x_i + x_d\, x_o + x_i\, x_o} \qquad \ldots (3.81f)$$

Napone izračunavamo iz formule

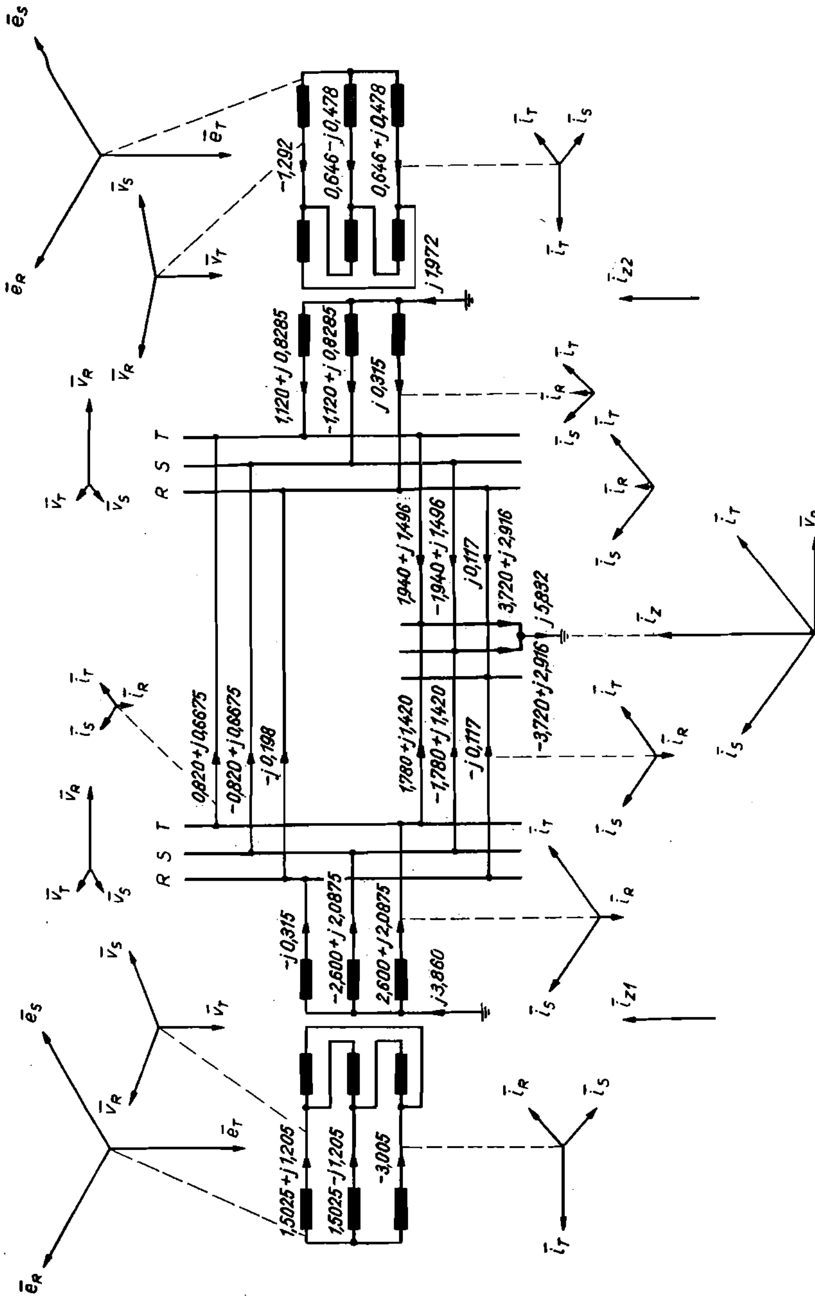
$$\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_i = \mathbf{v}_o = \mathbf{e}_d \frac{x_i\, x_o}{x_d\, x_i + x_d\, x_o + x_i\, x_o} \qquad \ldots (3.82)$$

koju dobivamo iz (3.5) i (3.79a).

Na sl. 3.44 do 3.46 prikazane su prilike za slučaj dvopolnog kratkog spoja uz istovremeni spoj sa zemljom na stezaljkama generatora, dok su na sl. 3.47 do 3.50 prikazane prilike u mreži za slučaj iste vrste kratkog spoja.



Slika 3.49. Struje i naponi dvopolnog kratkog spoja uz istodobni spoj sa zemljom u ekvivalentnim shemama mreže na sl. 3. 5. (kompletne ekvivalentne sheme)



Slika 3.50. Struje i naponi u mreži za slučaj dvopolnog kratkog spoja uz istodobni spoj sa zemljom

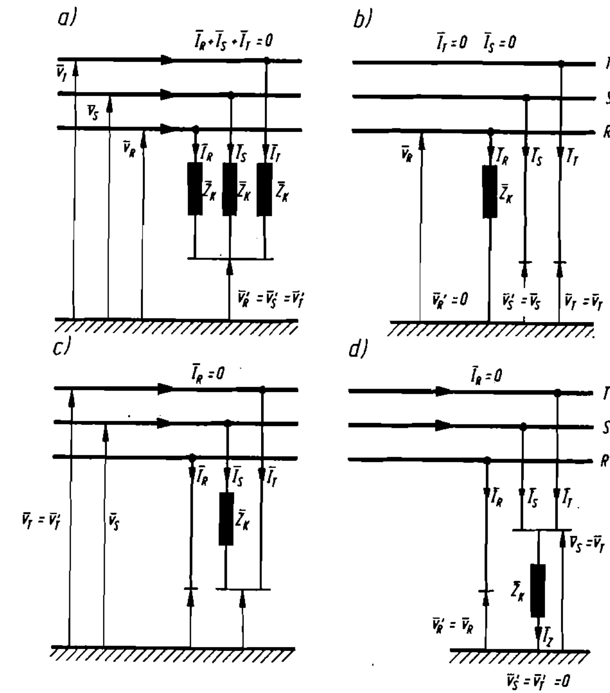
G. Kratki spoj preko impedancije

Izvedene formule vrijede za neposredne kratke spojeve. U nekim slučajevima međutim potrebno je razmatrati prilike u slučaju kada do kratkog spoja dolazi preko impedancije $\mathbf{Z}_K$ (sl. 3.51).

Za tropolni kratki spoj možemo postaviti (sl. 3.51a)

$$\mathbf{V}_R' = \mathbf{V}_S' = \mathbf{V}_T' \qquad \dots (3.83)$$

$$\mathbf{I}_R + \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T = 0 \qquad \dots (3.84)$$



Slika 3.51. Kratki spojevi preko impedancije

dok za napone iz (3.83) dobivamo

$$\mathbf{V}_R' = \mathbf{V}_R - \mathbf{I}_R\,\mathbf{Z}_K \qquad \dots (3.85a)$$

$$\mathbf{V}_S' = \mathbf{V}_S - \mathbf{I}_S\,\mathbf{Z}_K \qquad \dots (3.85b)$$

$$\mathbf{V}_T' = \mathbf{V}_T - \mathbf{I}_T\,\mathbf{Z}_K \qquad \dots (3.85c)$$

Za napon u direktnom sistemu — između priključnica K i P u ekvivalentnoj shemi — možemo napisati, uzmemo li u obzir (3.85)

$$\mathbf{V}_d = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + a\,\mathbf{V}_S + a^2\,\mathbf{V}_T) =$$

$$= \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R' + a\,\mathbf{V}_S' + a^2\,\mathbf{V}_T') +$$

$$+ \frac{1}{3}\mathbf{Z}_K(\mathbf{I}_R + a\,\mathbf{I}_S + a^2\,\mathbf{I}_T) = \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_K \quad \ldots (3.86)$$

Prvi član jednak je radi (3.83) nuli, dok je vrijednost drugog člana upravo jednaka produktu struje u direktnom sistemu (2.18b) i impedancije $\mathbf{Z}_K$.

Za napon među priključnicama K i P u inverznom sistemu, uzmemo li opet u obzir (3.85) i (2.18c), možemo postaviti

$$\mathbf{V}_i = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + a^2\,\mathbf{V}_S + a\,\mathbf{V}_T) =$$

$$= \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R' + a^2\,\mathbf{V}_S' + a\,\mathbf{V}_T') +$$

$$+ \frac{1}{3}(\mathbf{I}_R + a^2\,\mathbf{I}_S + a\,\mathbf{I}_T) = \mathbf{I}_i\,\mathbf{Z}_K \quad \ldots (3.87)$$

Za struju u nultom sistemu vrijedi i sada (3.35), pa je i $\mathbf{V}_o = 0$.

Polazeći od (3.5a) i (3.86) za struju u direktnom sistemu, moći ćemo postaviti

$$\mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_K = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_d \quad \ldots (3.88a)$$

pa je

$$\mathbf{I}_d = \frac{\mathbf{E}_d}{\mathbf{Z}_d + \mathbf{Z}_K} \quad \ldots (3.88b)$$

Iz (3.5b) i (3.87) možemo napisati

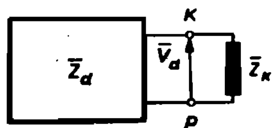
$$\mathbf{I}_i(\mathbf{Z}_K + \mathbf{Z}_i) = 0 \quad \ldots (3.89a)$$

pa je

$$\mathbf{I}_i = 0 \quad \ldots (3.89b)$$

jer je uvijek $\mathbf{Z}_K + \mathbf{Z}_i > 0$, pa je i $\mathbf{V}_i = 0$.

Pri određivanju prilika za slučaj tropolnog kratkog spoja mjerodavna je dakle samo ekvivalentna shema direktnog sistema, u kojoj je među priključnicama K i P spojena impedancija $\mathbf{Z}_K$ (sl. 3.52).



Slika 3.52. Prilike za slučaj tropolnog kratkog spoja preko impedancije (prikaz pojednostavnjenom ekvivalentnom shemom)

Za jednopolni kratki spoj (sl. 3.51b) možemo postaviti

$$\mathbf{V}_R' = 0 \quad \ldots (3.90)$$

$$\mathbf{I}_S = 0 \quad \ldots (3.91)$$

$$\mathbf{I}_T = 0, \quad \ldots (3.92)$$

dok za napon $\mathbf{V}_R'$ imamo

$$\mathbf{V}_R' = \mathbf{V}_R - \mathbf{I}_R\,\mathbf{Z}_K = 0 \quad \ldots (3.93)$$

Za struje u direktnom, inverznom i nultom sistemu, prema (3.50), dobivamo kao (3.51)

$$\mathbf{I}_d = \mathbf{I}_i = \mathbf{I}_o = \frac{1}{3}\mathbf{I}_R \quad \ldots (3.94)$$

Budući da je (3.93)

$$\mathbf{V}_R = \mathbf{I}_R\,\mathbf{Z}_K \quad \ldots (3.95)$$

prema (2.16a) dobivamo

$$\mathbf{V}_d + \mathbf{V}_i + \mathbf{V}_o = \mathbf{I}_R\,\mathbf{Z}_K \quad \ldots (3.96)$$

pa je — uzmemo li u obzir (3.5a)

$$-\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_o = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_d - \mathbf{I}_R\,\mathbf{Z}_K \quad \ldots (3.97)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz (3.5b), (3.5c) i (3.94), dobivamo

$$\mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_i + \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_o = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_d - 3\,\mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_K \quad \ldots (3.98)$$

Odakle dolazimo do relacije

$$\mathbf{I}_d = \frac{\mathbf{E}_d}{\mathbf{Z}_d + \mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K} \quad \ldots (3.99)$$

Osim toga (3.96) možemo napisati, uzevši u obzir i (3.94)

$$\mathbf{V}_d + \mathbf{V}_i + \mathbf{V}_o = 3\,\mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_K \quad \ldots (3.100)$$

Imamo dakle tri ekvivalentne sheme spojene u seriju, u koju je uključena i trostruka impedancija $\mathbf{Z}_K$ (sl. 3.53).

Za dvopolni kratki spoj možemo postaviti (sl. 3.51c)

$$\mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T = 0 \quad \ldots (3.101)$$

$$\mathbf{I}_R = 0 \quad \ldots (3.102)$$

$$\mathbf{V}_S' = \mathbf{V}_T' \quad \ldots (3.103)$$

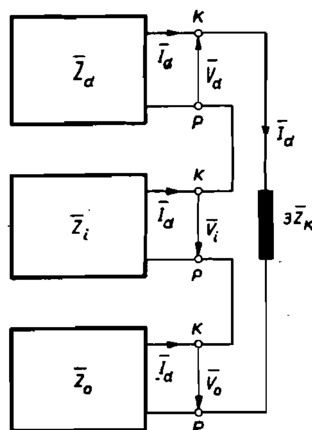
Za struje u direktnom i inverznom sistemu prema (3.65) i sada dobivamo

$$\mathbf{I}_d = -\mathbf{I}_i \quad \ldots (3.104)$$

dok je $\mathbf{I}_o = 0$

Za $\mathbf{V}_S'$ možemo (sl. 3.51c) pisati

$$\mathbf{V}_S' = \mathbf{V}_S - \mathbf{I}_S\,\mathbf{Z}_K \quad \ldots (3.105)$$



Slika 3.53. Prilike za slučaj jednopolnog kratkog spoja preko impedancije (prikaz pojednostavnjenim ekvivalentnim shemama)

pa je napon u direktnom sistemu, uzevši u obzir (3.103)

$$\mathbf{V}_d = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + a\,\mathbf{V}_S + a^2\,\mathbf{V}_T) =$$

$$= \frac{1}{3}[\mathbf{V}_R' + \mathbf{V}_T'(a + a^2)] + \frac{1}{3}a\,\mathbf{I}_S\,\mathbf{Z}_K \qquad \ldots (3.106)$$

jer je $\mathbf{V}_R = \mathbf{V}_R'$, te jer je uzeta u obzir i (3.105). Za napon u inverznom sistemu dobivamo

$$\mathbf{V}_i = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + a^2\,\mathbf{V}_S + a\,\mathbf{V}_T) =$$

$$= \frac{1}{3}[\mathbf{V}_R' + \mathbf{V}_T'(a + a^2)] + \frac{1}{3}a^2\,\mathbf{I}_S\,\mathbf{Z}_K \qquad \ldots (3.107)$$

Ako odbijemo (3.107) od (3.106), imat ćemo

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{V}_i + \frac{1}{3}(a - a^2)\,\mathbf{I}_S\,\mathbf{Z}_K \qquad \ldots (3.108)$$

a budući da je

$$\mathbf{I}_d = \frac{1}{3}(\mathbf{I}_R + a\,\mathbf{I}_S + a^2\,\mathbf{I}_T) \qquad \ldots (3.109)$$

pa je, ako uvažimo (3.101) i (3.102),

$$\mathbf{I}_d = \frac{1}{3}\mathbf{I}_S(a - a^2) \qquad \ldots (3.110)$$

Prema tome je

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{V}_i + \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_K \qquad \ldots (3.111)$$

pa iz (3.5a) i (3.5b), uzmemo li u obzir i (3.104), dobivamo

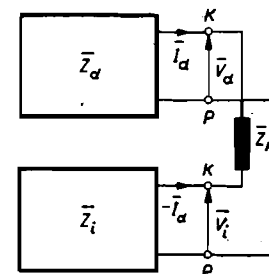
$$\mathbf{V}_i + \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_K = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_d \qquad \ldots (3.112a)$$

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_i \qquad \ldots (3.112b)$$

odakle je

$$\mathbf{I}_d = \frac{\mathbf{E}_d}{\mathbf{Z}_d + \mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_K} \qquad \ldots (3.113)$$

Relacije (3.111) i (3.113) ukazuju na spoj među ekvivalentnim shemama i impedancijom $\mathbf{Z}_K$ koji je prikazan na sl. 3.54.



Slika 3.54. Prilike za slučaj dvopolnog kratkog spoja preko impedancije (prikaz pojednostavnjenim ekvivalentnim shemama)

Za dvopolni kratki spoj s istovremenim spojem sa zemljom (sl. 3.51d) možemo postaviti, kao i za slučaj bez impedancije,

$$\mathbf{I}_R = 0 \qquad \ldots (3.114)$$

$$\mathbf{V}_S' = 0 \qquad \ldots (3.115)$$

$$\mathbf{V}_T' = 0 \qquad \ldots (3.116)$$

Iz izraza za struju u fazi R (2.16a) dobivamo

$$\mathbf{I}_d + \mathbf{I}_i + \mathbf{I}_o = 0 \qquad \ldots (3.117)$$

Za napone na mjestu kvara možemo postaviti

$$\mathbf{V}_R = \mathbf{V}_R' \qquad \ldots (3.118a)$$

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{V}_S' + \mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K = \mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K \qquad \ldots (3.118b)$$

$$\mathbf{V}_T = \mathbf{V}_T' + \mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K = \mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K \qquad \ldots (3.118c)$$

gdje je $\mathbf{I}_Z$ struja kroz impedanciju $\mathbf{Z}_K$, koja je jednaka

$$\mathbf{I}_Z = \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T \qquad \ldots (3.119)$$

Naponi u pojedinim sistemima jesu

$$\mathbf{V}_d = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + a^2\mathbf{V}_S + a\,\mathbf{V}_T) =$$

$$= \frac{1}{3}[\mathbf{V}_R' + (a^2 + a)\,\mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K] \qquad \ldots (3.120a)$$

$$\mathbf{V}_i = \frac{1}{3} (\mathbf{V}_R + a\,\mathbf{V}_S + a^2\,\mathbf{V}_T) =$$

$$= \frac{1}{3} [\mathbf{V}_R' + (a^2 + a)\,\mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K] \qquad \ldots (3.120\text{b})$$

$$\mathbf{V}_o = \frac{1}{3} (\mathbf{V}_R + \mathbf{V}_S + \mathbf{V}_T) =$$

$$= \frac{1}{3} (\mathbf{V}_R' + 2\,\mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K) \qquad \ldots (3.120\text{c})$$

Budući da je $a^2 + a = -1$, te uz dopunu (3.120c) s $-\frac{1}{3}\mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K$ i $+\frac{1}{3}\mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K$, dobivamo

$$\mathbf{V}_d = \frac{1}{3} (\mathbf{V}_R' - \mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K) \qquad \ldots (3.121\text{a})$$

$$\mathbf{V}_i = \frac{1}{3} (\mathbf{V}_R' - \mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K) \qquad \ldots (3.121\text{b})$$

$$\mathbf{V}_o = \frac{1}{3} (\mathbf{V}_R' - \mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K) + \mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K =$$

$$= \frac{1}{3} (\mathbf{V}_R' - \mathbf{I}_Z\,\mathbf{Z}_K) + 3\,\mathbf{I}_o\,\mathbf{Z}_K \qquad \ldots (3.121\text{c})$$

gdje je $\mathbf{I}_Z = 3\,\mathbf{I}_o$, što slijedi iz (2.18a) i (3.119). Prema tome možemo postaviti

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{V}_i = \mathbf{V}_o - 3\,\mathbf{I}_o\,\mathbf{Z}_K \qquad \ldots (3.122)$$

Kad uzmemo u obzir (3.117) i (3.122), možemo relacije (3.5) napisati u ovom obliku

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_d \qquad \ldots (3.123\text{a})$$

$$\mathbf{V}_d = (\mathbf{I}_d + \mathbf{I}_o)\,\mathbf{Z}_i \qquad \ldots (3.123\text{b})$$

$$\mathbf{V}_d + 3\,\mathbf{I}_o\,\mathbf{Z}_K = -\mathbf{I}_o\,\mathbf{Z}_o \qquad \ldots (3.123\text{c})$$

Postupkom kao u odjeljku F) ovog poglavlja dolazimo do struje u direktnom sistemu

$$\mathbf{I}_d = \frac{\mathbf{E}_d}{\mathbf{Z}_d + \dfrac{\mathbf{Z}_i\,(\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K)}{\mathbf{Z}_i + (\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K)}} \qquad \ldots (3.124\text{a})$$

koju možemo napisati i u obliku

$$\mathbf{I}_d = \mathbf{E}_d \frac{\mathbf{Z}_i + (\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K)}{\mathbf{Z}_d\,\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_d\,(\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K) + \mathbf{Z}_i\,(\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K)} \qquad \ldots (3.125\text{a})$$

Za struje u ostalim sistemima — analogno izloženom u odjeljku F) ovog poglavlja — dobivamo

$$\mathbf{I}_i = -\mathbf{E}_d \frac{\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K}{\mathbf{Z}_d\,\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_d\,(\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K) + \mathbf{Z}_i\,(\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K)} \qquad \ldots (3.125\text{b})$$

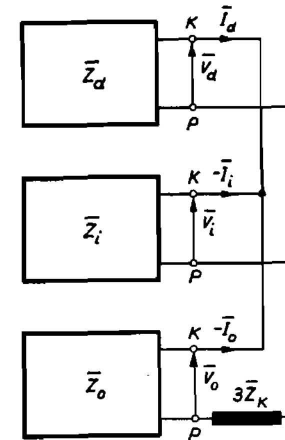
$$\mathbf{I}_o = -\mathbf{E}_d \frac{\mathbf{Z}_i}{\mathbf{Z}_d\,\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_d\,(\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K) + \mathbf{Z}_i\,(\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K)} \qquad \ldots (3.125\text{c})$$

dok su naponi u pojedinim sistemima

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{V}_i = \mathbf{E}_d \frac{\mathbf{Z}_i\,(\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K)}{\mathbf{Z}_d\,\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_d\,(\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K) + \mathbf{Z}_i\,(\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K)} \qquad \ldots (3.126\text{a})$$

$$\mathbf{V}_o = \mathbf{E}_d \frac{\mathbf{Z}_i\,\mathbf{Z}_o}{\mathbf{Z}_d\,\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_d\,(\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K) + \mathbf{Z}_i\,(\mathbf{Z}_o + 3\,\mathbf{Z}_K)} \qquad \ldots (3.126\text{b})$$

Međusobni spoj ekvivalentnih shema prikazan je na sl. 3.55.



Slika 3.55. Prilike za slučaj dvopolnog kratkog spoja s istovremenim spojem sa zemljom (prikaz pojednostavnjenim ekvivalentnim shemama)

H. Usporedba vrsta kratkog spoja prema veličini struje

Pri izboru opreme u rasklopnom postrojenju potrebno je znati za koju se vrstu kratkog spoja pojavljuje najveća struja, jer je veličina struje kratkog spoja, normalno, mjerodavna za taj izbor.

Odredimo veličinu struje u odnosu na struju za slučaj tropolnog kratkog spoja, koju možemo prema (3.36) i (3.39a) napisati u obliku

$$I_{k3} = \frac{E_d}{Z_d} \qquad \ldots (3.127)$$

Ako uvedemo omjere

$$\alpha = \frac{Z_i}{Z_d} \qquad \ldots (3.128a)$$

$$\beta = \frac{Z_i}{Z_o} \qquad \ldots (3.128b)$$

možemo struju za slučaj jednopolnog kratkog spoja odrediti iz relacije, koristeći (3.55a)

$$I_{k1} = I_{k3} \frac{3\,\beta}{\alpha\,(1+\beta)+\beta} \qquad \ldots (3.129)$$

Za struju dvopolnog kratkog spoja — prema (3.70) — dobivamo

$$I_{k2} = I_{k3} \frac{\sqrt{3}}{1+\alpha} \qquad \ldots (3.130)$$

dok prema (3.81) za dvopolni kratki spoj s istovremenim spojem sa zemljom imamo

$$I_{k2z} = I_{k3} \sqrt{3}\, \frac{\sqrt{\beta^2+\beta+1}}{1+\alpha+\beta} \qquad \ldots (3.131)$$

Međusobne odnose veličina struja možemo zgodno prikazati u koordinatnom sistemu α (128a) i β (128b), ako uvedemo relativne veličine struje u odnosu na struju tropolnog kratkog spoja

$$k_1 = \frac{I_{k1}}{I_{k3}} = \frac{3\,\beta}{\alpha\,(1+\beta)+\beta} \qquad \ldots (3.132a)$$

$$k_2 = \frac{\sqrt{3}}{1+\alpha} \qquad \ldots (3.132b)$$

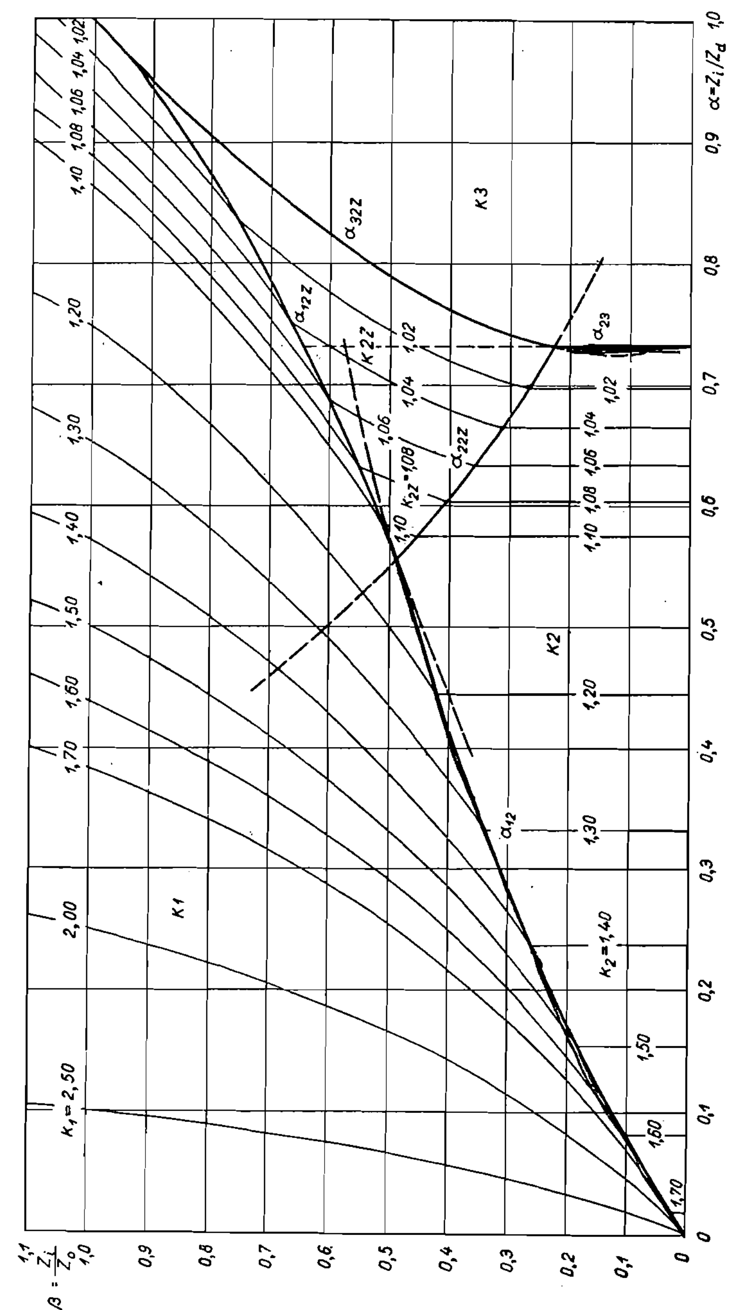
$$k_{2z} = \sqrt{3}\, \frac{\sqrt{\beta^2+\beta+1}}{1+\alpha+\beta} \qquad \ldots (3.132c)$$

Uz k_1, k_{2z} i k_2 kao parametre možemo u koordinatnom sistemu α, β ucrtati krivulje konstantnih relativnih veličina struja u odnosu na struju tropolnog kratkog spoja. Usporedbom relativnih veličina struja određuju se područja u kojima se pojavljuje najveća struja za određenu vrstu kratkog spoja (sl. 3.56). Granice između područja pojedinih vrsta kratkog spoja određene su relacijama koje dobivamo izjednačenjem relativnih veličina struja, pri čemu za relativnu veličinu struje tropolnog kratkog spoja treba postaviti $k_3 = 1$. Tako za granicu područja između jednopolnog i dvopolnog kratkog spoja dobivamo ($k_1 = k_2$)

$$\alpha_{12} = \frac{\beta\,(\sqrt{3}-1)}{1-\beta\,(\sqrt{3}-1)} = \frac{0{,}732\,\beta}{1-0{,}732\,\beta} \qquad \ldots (3.133a)$$

a za granicu područja između dvopolnog i tropolnog kratkog spoja ($k_2 = k_3$) imamo

$$\alpha_{23} = \sqrt{3} - 1 = 0{,}732. \qquad \ldots (3.133b)$$



Slika 3.56. Područja omjera Z_i/Z_d i Z_i/Z_o u kojima se pojavljuju najveće struje za različite vrste kratkog spoja

Granica područja između tropolnog i dvopolnog kratkog spoja s istovremenim spojem sa zemljom ($k_3 = k_{2z}$) određena je relacijom

$$a_{32z} = \sqrt{3}\sqrt{\beta^2 + \beta + 1} - (1 + \beta), \qquad \ldots (3.133c)$$

Kao granicu područja između dvopolnog kratkog spoja i dvopolnog s istovremenim spojem sa zemljom dobivamo ($k_2 = k_{2z}$)

$$a_{22z} = \frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 + \beta + 1} - 1} - 1, \qquad \ldots (3.133d)$$

dok je granica između jednopolnog i dvopolnog kratkog spoja s istovremenim spojem sa zemljom ($k_1 = k_{2z}$) određena relacijom

$$a_{12z} = \beta \frac{\sqrt{3}(1 + \beta) - \sqrt{\beta^2 + \beta + 1}}{(1 + \beta)\sqrt{\beta^2 + \beta + 1} - \beta\sqrt{3}} \qquad \ldots (3.133e)$$

Prema tome u području označenom sa K3 na sl. 3.56 najveću struju imamo za slučaj tropolnog kratkog spoja, u području K2Z za slučaj dvopolnog kratkog spoja s istovremenim spojem sa zemljom, u području K2 za slučaj dvopolnog, a u području K1 za slučaj jednopolnog kratkog spoja. Sve to vrijedi za mrežu s uzemljenom nul-tačkom, jer tada Z_0 ima konačnu vrijednost. Za mreže sa izoliranom nul-tačkom, međutim, nulta impedancija ima beskonačno veliku vrijednost, pa je $\beta = 0$, te za takvu mrežu vrijede odnosi na apscisi dijagrama na sl. 3.56.

Dijagram na sl. 3.56 tačan je ako su kutovi impedancije Z_d, Z_i i Z_0 međusobno jednaki, odnosno ako računamo samo s reaktancijom (uz zanemarenje djelatnih otpora).

Za veličinu struja kratkog spoja, koje se određuju pomoću početnih reaktancija generatora (X_d''), možemo postaviti da je $a \cong 1$, jer su tada direktna i inverzna reaktancija praktički međusobno jednake. To vrijedi i za slučaj kratkog spoja na priključnicama generatora, te za slučaj kratkog spoja daleko od generatora. Prema tome za spomenute veličine struja kratkog spoja mjerodavan je tropolni kratki spoj kad je $Z_i/Z_0 \leqq 1$ (odnosno kad je $X_i/X_0 \leqq 1$) ili jednopolni kratki spoj kad je $Z_i/Z_0 > 1$. Za mrežu s izoliranom nul-tačkom međutim dolazi u obzir samo tropolni kratki spoj.

Pri izračunavanju veličine struja koje se određuju pomoću sinhrone reaktancije (X_d), ako se radi o kratkom spoju na priključnicama generatora, možemo postaviti da je $a = 0{,}1$ do $0{,}3$. Tada je za velike vrijednosti Z_0 (X_0) mjerodavan dvopolni, dok je za praktične vrijednosti Z_0 (ako je mreža neposredno uzemljena) mjerodavan jednopolni kratki spoj. U slučaju kratkog spoja udaljenog od generatora omjer a postajat će to veći, što je veća reaktancija između generatorskih priključnica i mjesta kratkog spoja.

Dijagram na sl. 3.56 može poslužiti, osim za određivanje vrste kratkog spoja pri kojem se pojavljuje najveća struja u jednoj od faza, i za približno određivanje maksimalne struje kratkog spoja, ako poznajemo struju u slučaju tropolnog kratkog spoja.

3.3. STANJE MREŽE I ODREĐIVANJE STRUJA KRATKOG SPOJA

Vrijednost struja kratkog spoja ne ovise samo o vrsti kratkog spoja, karakteristikama i međusobnoj vezi pojedinih dijelova mreže, nego i o tome koji su od postojećih dijelova mreže u pogonu. To vrijedi za cijele elektrane, kao i za pojedine agregate u njima.

Tu se sukobljavamo s mnogo nepoznanica. Jedna je od mogućnosti pretpostavka da su u pogonu svi generatori, svi transformatori i svi vodovi koji postoje. Takva pretpostavka sigurno dovodi do prevelikih struja kratkog spoja, pa će u nekim slučajima dovesti do predimenzioniranja postrojenja. Korisno je ipak poznavati struje kratkog spoja i uz takvu pretpostavku, jer one predstavljaju maksimalne vrijednosti koje se uopće mogu pojaviti u promatranoj mreži. Bolje poznavanje prilike u elektroenergetskom sistemu dovodi do pretpostavki, pa i rezultata, bližih stvarnim prilikama. U elektroenergetskim sistemima u kojima rade hidroelektrane i termoelektrane nije dovoljno promatrati samo jedno stanje u mreži, jer su prilike u njoj ovisne o dotoku vode hidroelektranama. Da se odrede karakteristične situacije, obično je dovoljno promatrati dva stanja: u doba velikih voda i u doba malih voda u hidroelektranama i to u oba slučaja u trenutku maksimalnog opterećenja. Tačno određivanje stanja u mreži u ta dva momenta spojeno je s mnogim poteškoćama, jer se radi o nizu promjenljivih veličina i jer se, normalno, radi o prilikama u budućnosti, koje nije moguće tačnije poznavati. Radi toga stanja mreže određujemo uz pretpostavke koje približno odgovaraju prilikama u mreži.

Za razdoblje velikih voda mogle bi se prihvatiti slijedeće pretpostavke:

protočne hidroelektrane — svi agregati u pogonu,

hidroelektrane s dnevnom i nedjeljnom akumulacijom — svi agregati u pogonu,

hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom — svi agregati u pogonu, radi sprečavanja preljeva,

hidroelektrane s velikom akumulacijom za višegodišnju regulaciju — svi agregati izvan pogona, jer se akumulacija puni u vrijeme velikih voda,

termoelektrane — dopunjuju manjak snage do maksimalnog opterećenja; stavljanje u pogon termoelektrana prema redu ekonomičnosti; potrebno voditi računa o rezervi za opskrbu sistema kao cjeline i pojedinih područja, što ovisi o konfiguraciji mreže.

U razdoblju malih voda mogli bismo prihvatiti slijedeće pretpostavke:

protočne hidroelektrane — računati s onoliko agregata u pogonu, koliko ih je dovoljno za iskorištavanje malih voda,

hidroelektrane s dnevnom i nedjeljnom akumulacijom — svi agregati u pogonu; ako se radi o elektroenergetskom sistemu u kojemu je udio hidroelektrana malen, odnosno onoliko agregata u pogonu, koliko ih je dovoljno za iskorištenje malih voda,

hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom — svi agregati u pogonu,

hidroelektrane s velikom akumulacijom za višegodišnju regulaciju — svi agregati u pogonu,
termoelektrane — svi agregati u pogonu.

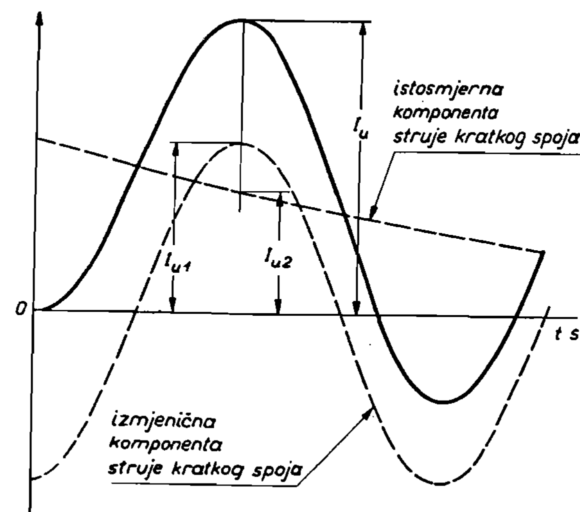
Mnogo je teže pronaći kriterije za određivanje broja transformatora i vodova u pogonu, te načina zatvaranja zamki u mreži za dva spomenuta perioda. Radi toga je najkorisnije pretpostaviti da su svi transformatori i svi vodovi u pogonu, te da su sve zamke zatvorene. Takva pretpostavka dovodi u većini slučajeva do većih struja kratkog spoja od onih koje će se u stvarnom pogonu pojavljivati, ali odstupanja neće biti znatna, jer se situacija u pogonu neće bitno razlikovati od pretpostavljene.

U pogledu uzemljenja nul-tačke transformatora — u neposredno uzemljenoj mreži — trebalo bi uzeti u obzir stvarno stanje u mreži, no ako to nije poznato, treba računati da je u svakoj transformatorskoj stanici uzemljen po jedan transformator.

3.4. UDARNA STRUJA KRATKOG SPOJA

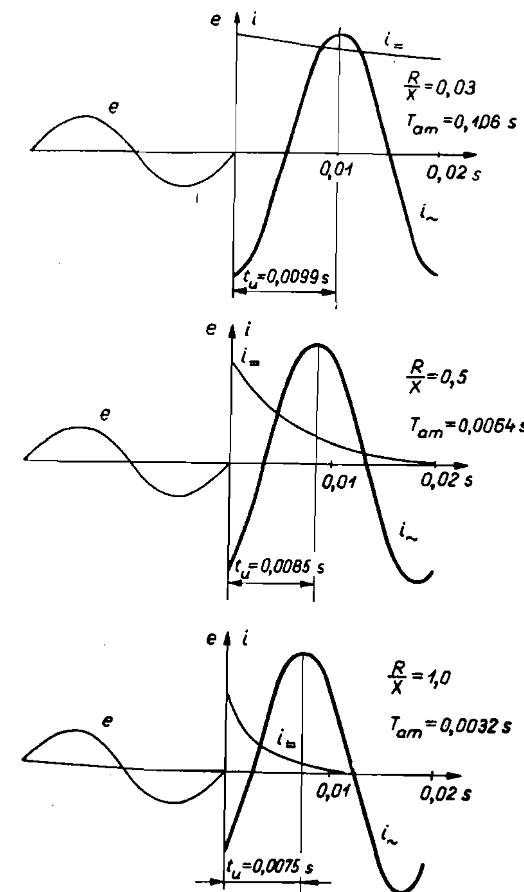
A. Definicija i nužnost poznavanja udarne struje

Udarna struja I_u jest maksimalna tjemena vrijednost struje kratkog spoja (sl. 3.57). Prema izloženome u odjeljku 2.3, maksimalna trenutna



Slika 3.57. Uz definiciju udarne struje kratkog spoja

vrijednost struje pojavit će se onda kada kratki spoj nastane u trenutku kad je napon jednak nuli, jer će se tada pojaviti maksimalna istosmjerna komponenta struje kratkog spoja. Maksimalna tjemena vrijednost u strujnom krugu bez djelatnog otpora pojavit će se polovinu periode nakon nastanka kratkog spoja ($t_u = 0{,}01$ sekunda). U krugu s djelatnim otporom maksimalna struja pojavit će se prije nego što prođe polovina periode ($t_u < 0{,}01$ sekunda), to ranije, što je omjer djelatnog otpora i reaktancije veći (sl. 3.58).



Slika 3.58. Izmjenična i istosmjerna komponenta struje kratkog spoja za različite omjere R/X u prvoj periodi nakon nastanka kratkog spoja

Poznavanje udarne struje potrebno je da bi se odredila maksimalna naprezanja dijelova postrojenja, aparata i namota u strojevima, jer te uređaje treba tako dimenzionirati da mogu izdržati maksimalna naprezanja.

B. Određivanje udarne struje kratkog spoja

Prilikom određivanja udarne struje kratkog spoja ne možemo zanemariti djelatni otpor, ako se radi o kratkom spoju nešto dalje od generatora, jer bi to dovelo do znatne greške, pogotovo s obzirom na istosmjernu komponentu struje kratkog spoja. Polazeći od jednadžbe (2.122),

koja vrijedi ako je djelatni otpor zanemaren, možemo izraz za struju kratkog spoja, uzimajući u obzir djelatni otpor, napisati u obliku

$$i = -V_m \left\{ \left[\left(\frac{1}{Z_d''} - \frac{1}{Z_d'} \right) e^{-t/T_{dm}''} + \left(\frac{1}{Z_d'} - \frac{1}{Z_d} \right) e^{-t/T_{dm}'} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \frac{1}{Z_d} \right] \sin(\omega t - \varphi) + \frac{1}{Z_d''} e^{-t/T_{am}} \sin \varphi \right\} \qquad \ldots (3.134)$$

U (3. 134) V_m znači tjemenu vrijednost faznog napona, dok je

$$Z_d'' = X_{dg}'' + Z_{dm} \qquad \ldots (3.135a)$$

$$Z_d' = X_{dg}' + Z_{dm} \qquad \ldots (3.135b)$$

$$Z_d = X_{dg} + Z_{dm} \qquad \ldots (3.135c)$$

gdje su X_{dg}'', X_{dg}' i X_{dg} reaktancije generatora, a Z_m impedancija od priključnica generatora do mjesta kratkog spoja. Vremenske konstante koje dolaze u izrazu (3. 134) mogu se definirati ovim relacijama

$$T_{dm}'' = T_{do}'' \frac{X_{dg}'' + Z_{dm}}{X_{dg}' + Z_{dm}} \qquad \ldots (3.136a)$$

$$T_{dm}' = T_{do}' \frac{X_{dg}' + Z_{dm}}{X_{dg} + Z_{dm}} \qquad \ldots (3.136b)$$

$$T_{am} = \frac{X_{dg}'' + X_{dm}}{\omega (r + R_m)} \qquad \ldots (3.136c)$$

gdje su X_{dm} i R_m reaktancija, odnosno djelatni otpor mreže od priključnica generatora do mjesta kratkog spoja, a r djelatni otpor statorskog namota generatora, koji zanemarujemo u svim izrazima, osim u (3.136c). Do relacija (3.136) dolazimo iz (2.110) i (2.108c). Veličina φ zadana je relacijom

$$\varphi = \text{arc tg} \frac{X_{dg}'' + X_{dm}}{r + R_m} \qquad \ldots (3.137)$$

koji za $r + R_m = 0$ (zanemaren djelatni otpor) postaje $\frac{\pi}{2}$, pa (3.134) prelazi u (2.122) uz $\vartheta_0 = 0$.

Iz (3.134) dolazimo do izraza za udarnu struju, ako postavimo $t = t_u$, gdje je t_u vrijeme nakon nastanka kratkog spoja kad se pojavljuje maksimalna struja, a to se događa kada je

$$\sin(\omega t - \varphi) = 1 \qquad \ldots (3.138)$$

odnosno kad je

$$\omega t - \varphi = \frac{\pi}{2} \qquad \ldots (3.139)$$

Iz (3.139), ako φ izrazimo u stupnjevima, dobivamo

$$t_u = \frac{90° + \varphi°}{360° f} \qquad \ldots (3.140)$$

gdje je f frekvencija mreže. Prema tome je udarna struja, ako uzmemo u obzir njezinu apsolutnu vrijednost

$$I_u = V_m \left[\left(\frac{1}{Z_d''} - \frac{1}{Z_d'} \right) e^{-t_u/T_{dm}''} + \left(\frac{1}{Z_d'} - \frac{1}{Z_d} \right) e^{-t_u/T_{dm}'} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{Z_d} + \frac{1}{Z_d''} e^{-t_u/T_{am}} \sin \varphi \right] \qquad \ldots (3.141)$$

Budući da je $t_u \leqq 0{,}01$ sek., možemo bez veće pogreške postaviti da je

$$e^{-t_u/T_{dm}'} \cong 1 \qquad \ldots (3.142)$$

T_{dm}' na priključnicama generatora iznosi naime između 0,2 i 3,3 sek. (tab. 2.2), dok T_{dm}' teži prema T_{do}' što je veća impedancija između priključnica generatora i mjesta kratkog spoja, dakle kao granični slučaj T_{dm}' može postići vrijednost T_{do}' tj. između 1,5 i 10,0 sek. (tab. 2.2). Krajnje granice unutar kojih se kreće (3.142) jesu 0,951 i 0,999. Ako dakle (3.142) postavimo jednako 1, učinit ćemo u najnepovoljnijem slučaju pogrešku od 1,5%, jer drugi član izraza (3.141) sudjeluje tada sa oko 30% u ukupnoj udarnoj struji.

Uzevši u obzir (3.142), relaciju (3.141) možemo napisati u obliku

$$I_u = V_m \left[\left(\frac{1}{Z_d''} - \frac{1}{Z_d'} \right) e^{-t_u/T_{dm}''} + \frac{1}{Z_d'} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{Z_d''} e^{-t_u/T_{am}} \sin \varphi \right] \qquad \ldots (3.143)$$

Zgodno je (Lit. 20) da se udarna struja prikaže faktorom k, koji je definiran omjerom

$$k = \frac{I_u}{I_k'' \sqrt{2}} \qquad \ldots (3.144)$$

gdje je I_k'' efektivna vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja neposredno nakon njezina nastanka, a definirana je relacijom

$$I_k'' = \frac{V}{Z_d''}, \qquad \ldots (3.145)$$

pa je k — uzimajući u obzir da je $V_m = V\sqrt{2}$

$$k = \left(1 - \frac{Z_d''}{Z_d'} \right) e^{-t_u/T_{dm}''} + \frac{Z_d''}{Z_d'} +$$

$$+ e^{-t_u/T_{am}} \sin \varphi \qquad \ldots (3.146)$$

Dvije veličine utječu na k: omjer Z_d''/Z_d' i omjer R/X, gdje su $R = r + R_m$, a $X = X_{dg}'' + X_{dm}$. (3.136c). Prvi omjer kreće se u granicama

$$\frac{X_{dg}''}{X_{dg}'} \leqq \frac{Z_d''}{Z_d'} \leqq 1 \qquad \ldots (3.147)$$

jer najmanju vrijednost postiže kad do kratkog spoja dođe na priključnicama generatora, dok se maksimalna vrijednost postiže kad se između generatora i mjesta kratkog spoja nalaze velike impedancije, pa se tada može postaviti da je $Z_d'' \cong Z_d'$. Drugi je omjer

$$\frac{R}{X} \geq \frac{r}{X_{dg}''} \qquad \ldots (3.147a)$$

Najmanji je dakle kad se kratki spoj dogodi na priključnicama generatora.

Omjer Z_d''/Z_d' utječe na prvi i drugi član, dok omjer R/X utječe na prvi i treći član. Pogledajmo najprije utjecaje na zbroj prvog i drugog člana. S povećanjem omjera Z_d''/Z_d' prvi član postaje sve manji, a drugi veći, pa je utjecaj prigušenja sve manji. Osim toga, s povećanjem omjera Z_d''/Z_d' povećava se i vremenska konstanta T''_{dm} (3.136a), pa i to utječe na povećanje zbroja prvog i drugog člana, s povećanjem omjera Z_d''/Z_d'. S druge pak strane povećanje omjera R/X dovodi do smanjenja vremena t_u (3.140), što utječe na povećanje prvog člana, uz konstantni omjer Z_d''/Z_d'. Prema tome povećanje obaju omjera dovodi do povećanja zbroja prvih dvaju članova. Taj utjecaj međutim nije znatan, jer npr. za $Z_d''/Z_d' = 0{,}70$ i $R/X = 0$ zbroj prvih dvaju članova iznosi 0,925, a za $Z_d''/Z_d' = 0{,}90$ i $R/X = 2{,}0$ zbroj iznosi 0,981, uz inače iste uvjete. Naravno da je za slučaj kada je $Z_d''/Z_d' = 1$ zbroj prvog i drugog člana jednak 1. Treći član, međutim, kako je već spomenuto, ovisi samo o omjeru R/X, a njegova vrijednost naglo opada s povećanjem omjera R/X, pa se može i zanemariti kad R/X postane veće od 2, što se u praksi rijetko događa.

Zbroj prvih dvaju članova vrlo je blizu jedinici, pa je za praktičke račune dovoljno uzeti u obzir relaciju

$$k = 1 + e^{-t_u/T_{am}} \sin \varphi \qquad \ldots (3.147b)$$

Da se izbjegne računanje neki propisi navode ovisnost veličine k o omjeru R/X. Tako njemački propisi (Lit. 20) daju ovisnost prikazanu na sl. 3.59, pa se udarna struja određuje — uzimajući u obzir (3.144) i (3.145) — iz izraza

$$I_u = k\, I_k'' \sqrt{2} \qquad \ldots (3.148)$$

Prema njemačkim propisima (Lit. 20) može se pri određivanju struje I_k'' (3.145) zanemariti djelatni otpor ako je $R \leqq 0{,}3$ X. Naravno da se zanemarenje djelatnog otpora ne odnosi na omjer k. Uz zanemarenje djelatnog otpora, udarnu struju određujemo iz izraza

$$I_u = k \sqrt{2} \frac{V}{X_d''} \qquad \ldots (3.149)$$

u kojemu je

$$X_d'' = X_{dg}'' + X_{dm} \qquad \ldots (3.150)$$

gdje je X_{dm} reaktancija mreže između priključnica generatora i mjesta kratkog spoja. Izraz (3.149) najčešće se upotrebljava u praksi.

Izraz (3.149) vrijedi za tropolni kratki spoj, dok se u slučaju jednopolnog kratkog spoja udarna struja kratkog spoja određuje iz relacije

$$I_u = k \sqrt{2} \frac{3\,V}{X_d'' + X_i + X_o} \qquad \ldots (3.151)$$

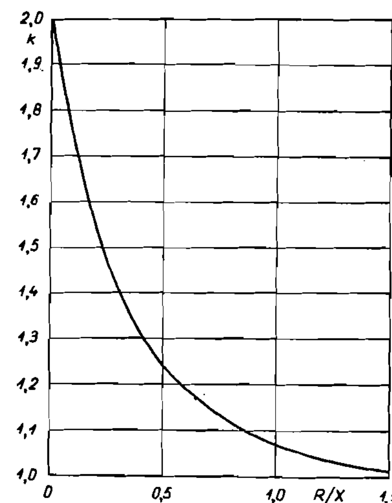
u kojoj je veličina k definirana relacijom (3.147b), odnosno krivuljom na sl. 3.59. Dovoljno je da se omjer R/X odredi prema djelatnom otporu i reaktanciji u direktnom sistemu, dakle isti omjer kao i pri tropolnom kratkom spoju. U (3.151) znači

$$X_i = X_{ig} + X_{im} \qquad \ldots (3.151a)$$

gdje su X_{ig} inverzna reaktancija generatora, a X_{im} inverzna reaktancija mreže od priključnica generatora do mjesta kratkog spoja, dok je

$$X_o = X_{og} + X_{om} \qquad \ldots (3.151b)$$

gdje analogno X_{og} predstavlja nultu reaktanciju generatora, a X_{om} nultu reaktanciju mreže između priključnica generatora i mjesta kratkog spoja.



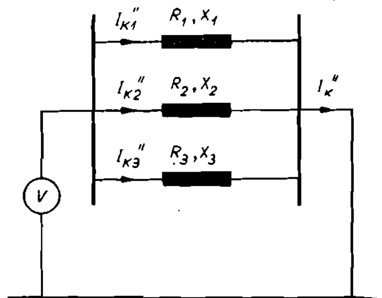
Slika 3.59. Ovisnost faktora k (3.144) o omjeru djelatnog otpora (R) i reaktancije (X)

Označavanje reaktancija koje dolaze u formulama za izračunavanje struja kratkog spoja, kao sume reaktancije generatora i reaktancije ostale mreže, ima svoj pravi smisao samo onda kad se radi o napajanju mreže jednim generatorom. U drugim slučajevima suma predstavlja samo simboličku operaciju, kojom se želi pokazati koju od reaktancija generatora treba postaviti u ekvivalentnu shemu, da bi se odredila ukupna mjerodavna reaktancija od nul-tačke generatora do mjesta kratkog spoja.

Poseban je problem određivanja omjera R/X za veću mrežu. Da bi se odredio omjer R/X, potrebno je cijelu mrežu svesti na jednu rezultantnu impedanciju, pa iz nje odrediti omjer R/X. Takav je računski postupak međutim za nešto veću mrežu dugotrajan. Postavljanjem mreže na izmjenični model moguće je mjerenjem odrediti djelatni otpor i impedanciju, a odatle i omjer R/X.

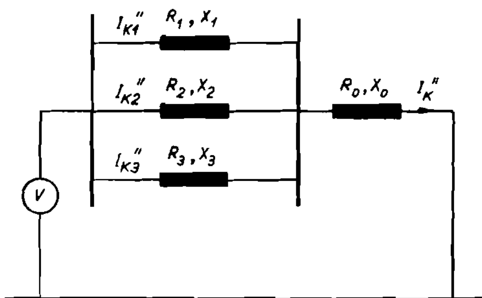
Da bi se pojednostavnio račun (Lit. 20), može se kao mjerodavan omjer R/X uzeti najmanji omjer dijelova mreže kroz koji se zatvara struja kratkog spoja ili dio struje kratkog spoja, odnosno može se približnim računom odrediti rezultantna veličina k. Za tri paralelno spojena dijela mreže (sl. 3.60) rezultantnu veličinu k određujemo iz relacije

$$k \cong k_1 \frac{I_{k1}''}{I_k''} + k_2 \frac{I_{k2}''}{I_k''} + k_3 \frac{I_{k3}''}{I_k''} \qquad \ldots (3.152)$$



Slika 3.60. Shema spoja za prikaz približnog određivanja relativne veličine k za više paralelno spojenih dijelova mreže

gdje je I_k'' efektivna vrijednost izmjenične komponente ukupne struje kratkog spoja određene prema (3.145), odnosno prema relaciji $I_k''=V/X_{dm}''$ (ako se zanemare djelatni otpori). U (3.152) I_{k1}'', I_{k2}'' i I_{k3}'' su efektivne vrijednosti struja koje teku kroz paralelne grane, dok su k_1, k_2 i k_3 veličine određene prema omjerima R/X (sl. 3.59) za svaku granu posebno.



Slika 3.61. Shema spoja za prikaz približnog određivanja rezultantne veličine k za više paralelnih dijelova mreže spojenih u seriju s daljnim dijelom mreže

Pri određivanju približne vrijednosti za k za dio mreže spojene prema shemi na sl. 3.61 potrebno je najprije odrediti veličinu k_p za paralelno spojene dijelove mreže prema (3.152), pa pomoću dijagrama sa sl. 3.59 odrediti rezultantni omjer R_p/X_p. Veličina rezultantne impedancije Z_p za paralelno spojene dijelove mreže izračunava se iz relacije

$$\frac{1}{Z_p} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \qquad \ldots (3.153)$$

pa se pomoću Z_p i R_p/X_p mogu odrediti rezultantni djelatni otpor R_p i rezultantna reaktancija X_p za paralelno spojene dijelove mreže. Ukupni

djelatni otpor — uzevši u obzir i u seriju spojenu impedanciju — određuje se sada iz izraza

$$R = R_p + R_o \qquad \ldots (3.154a)$$

a analogno i ukupna reaktancija

$$X = X_p + X_o \qquad \ldots (3.154b)$$

Veličine R i X sada su osnova za određivanje veličine k za cijelu mrežu prikazanu na sl. 3.61.

U numeričkom primjeru, uz prijedlog za reviziju američkog standarda (Lit. 22) za određivanje omjera R/X, ukupni djelatni otpor mreže (R) određuje se neovisno o reaktancijama, kao da dijelovi mreže (generatori, transformatori, vodovi) imaju samo djelatni otpor. Analogno tom ukupna reaktancija mreže (X) određuje se neovisno o djelatnom otporu.

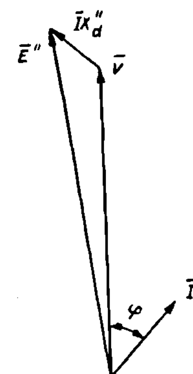
C. Propisi za određivanje udarne struje kratkog spoja

Njemački propisi (Lit. 20) uzimaju u obzir opadanje struje kratkog spoja radi prigušenja, što je uzeto u obzir omjerom R/X (sl. 3.59). Prema njemačkim propisima, napon koji djeluje pri kratkom spoju treba da bude za 10% viši od pogonskog napona mreže, pa bi mjesto (3.149) i (3.151) trebalo pisati

$$I_u = k\sqrt{2}\,\frac{1{,}1\ V}{X_d''} \qquad \ldots (3.155)$$

$$I_u = k\sqrt{2}\,\frac{1{,}1 \cdot 3\ V}{X_d'' + X_i + X_o} \qquad \ldots (3.156)$$

Razlog tome povišenju jest u predopterećenju generatora prije nastanka kratkog spoja. U trenutku nastanka kratkog spoja generator ima — kako je pokazano u poglavlju 2 — početnu reaktanciju X_{dg}'', pa je elektromo-



Slika 3.62. Elektromotorna sila $\mathbf{E}''$ generatora u momentu nastanka kratkog spoja ($\mathbf{I}$ struja opterećenja prije nastanka kratkog spoja)

torna sila koja djeluje na kratkospojenu mrežu određena sumom napona na stezaljkama generatora V i pada napona u početnoj reaktanciji (sl. 3.62). Elektromotornu silu E'' možemo odrediti iz relacije

$$E'' = \sqrt{(V + I\,X_{dg}''\sin\varphi)^2 + (I\,X_{dg}''\cos\varphi)^2} \quad \ldots (3.157)$$

koja, prikazana u jediničnim vrijednostima, ako računamo s nazivnom strujom opterećenja i nazivnim naponom kao osnovnim veličinama (poglavlje 2.8a), glasi

$$e'' = \sqrt{(1 + x_{dg}''\sin\varphi)^2 + (x_{dg}''\cos\varphi)^2} \quad \ldots (3.158)$$

Veličina e'' u najnepovoljnijem slučaju može iznositi i 1,2 ali uzmemo li u obzir da svi generatori neće biti opterećeni nazivnom strujom i neće raditi s niskim faktorom snage, možemo približno postaviti da će e'' biti jednak 1,1.

Po američkim propisima (Lit. 21), udarna struja kratkog spoja određuje se prema ekvivalentnoj shemi u kojoj su asinhroni motori predstavljeni početnim reaktancijama. Iz takve sheme određuje se efektivna vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja

$$I_k'' = \frac{V}{X_d''} \quad \ldots (3.159)$$

Efektivna vrijednost udarne struje kratkog spoja dobiva se iz efektivne vrijednosti izmjenične komponente, prema relaciji

$$I_{u\,ef} = k'\,I_k'' \quad \ldots (3.160)$$

U (3.160) treba uvrstiti $k' = 1{,}6$ za slučaj kratkog spoja u mreži koja ima nazivni napon viši od 5 kV, a $k' = 1{,}5$, ako se radi o mreži s nazivnim naponom nižim od 5 kV. Za dijelove mreže koji se napajaju neposredno iz generatora treba postaviti $k' = 1{,}6$ i pored toga što je napon mreže niži od 5 kV.

Da bismo odredili tjemenu vrijednost struje definirane relacijom (3.160), možemo postaviti

$$I_{uef} = k'\,I_k'' = \sqrt{I_k''^2 + I_a^2} \quad \ldots (3.161)$$

gdje je I_a istosmjerna komponenta struje kratkog spoja, dok je efektivna vrijednost jednaka korijenu iz zbroja kvadrata komponenata struje. Iz (3.161) istosmjerna komponenta struje s kojom računaju američki propisi iznosi

$$I_a = I_k''\sqrt{k'^2 - 1} \quad \ldots (3.162)$$

pa je tjemena vrijednost struje

$$I_u = I_k''\sqrt{2} + I_a = I_k''(\sqrt{2} + \sqrt{k'^2 - 1}) \quad \ldots (3.163)$$

Da usporedimo veličinu udarne struje određenu po američkim i njemačkim propisima, možemo prema (3.163) odrediti veličinu

$$k'' = 1 + \sqrt{\frac{k'^2 - 1}{2}} \quad \ldots (3.164)$$

koja po svojem značenju potpuno odgovara veličini $k - u$ (3.155) i sl. 3.59 — prema njemačkim propisima. Za $k' = 1{,}6$ dobivamo $k'' = 1{,}883$, dok za $k' = 1{,}5$ dobivamo $k'' = 1{,}791$.

Prema tome za kratke spojeve u neposrednoj blizini generatora (vrlo malen omjer R/X) udarna struja određena prema njemačkim propisima bit će nešto veća od udarne struje određene prema američkim propisima i to radi faktora 1,1 koji dolazi u (3.155). Za kratke spojeve udaljenije od generatora udarna struja određena prema njemačkim propisima manja je od one određene prema američkim, radi smanjenja istosmjerne komponente struje kratkog spoja (utjecaj omjera R/X na sl. 3.59), što američki propisi ne uzimaju u obzir.

3.5. RASKLOPNA STRUJA KRATKOG SPOJA

A. Definicija rasklopne struje kratkog spoja i rasklopne snage sklopke

Rasklopna struja efektivna je vrijednost one struje kratkog spoja, koja protječe kroz sklopku u trenutku otvaranja kontakata. Pri određivanju rasklopne struje — prema današnjem shvaćanju — mjerodavna je početna reaktancija generatora (X_d''). Prije desetak godina u Evropi je smatrano da je pri određivanju rasklopne struje dovoljno računati s prelaznom reaktancijom (X_d') generatora.

Efektivna vrijednost rasklopne struje određena je relacijom

$$I_r = \sqrt{I_k''^2 + I_a^2} \quad \ldots (3.165)$$

gdje je I_k'' efektivna vrijednost izmjenične komponente struje tropolnog kratkog spoja određene omjerom efektivnog faznog nazivnog napona (V_n) na mjestu kvara i impedancije mreže od nul-tačke generatora do mjesta kvara (Z_d'')

$$I_k'' = \frac{V_n}{Z_d''} \quad \ldots (3.166)$$

dok je I_a istosmjerna komponenta struje kratkog spoja u trenutku otvaranja kontakata sklopke. Impedancija Z_d'' definirana je relacijom (3.135a).

Prilikom određivanja rasklopne struje normalno se posebno ne određuje veličina istosmjerne komponente, već se — ukoliko se uopće uzima u obzir utjecaj te komponente struje na rasklopnu struju — efektivna vrijednost izmjenične komponente množi s faktorom većim od 1 (već prema brzini isklapanja sklopke), odnosno s faktorom manjim od 1, ako se radi o relativno dugim vremenima isklapanja. Radi toga ćemo u daljnjim razmatranjima rasklopnom strujom smatrati efektivnu vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja, dok ćemo u poglavlju o propisima za određivanje rasklopne struje navesti faktore kojima trebamo množiti tako određenu struju da bismo došli do struje mjerodavne za izbor sklopke. Osim toga, u većini praktičkih slučajeva mogu se pri određivanju rasklopne struje zanemariti djelatni otpori, pa se efektivna vrijednost izmjenične komponente struje određuje iz relacije

$$I_{ks}'' = \frac{V_n}{X_d''} \quad \ldots (3.167)$$

gdje je X_d'' nadoknadna reaktancija mreže od nul-tačke generatorâ, koji su prikazani početnim reaktancijama, do mjesta kratkog spoja. U formuli (3.167), uz oznaku za struju, naveden je indeks 3, što znači da se radi o struji tropolnog kratkog spoja. O vrsti kratkog spoja pri određivanju mjerodavne rasklopne struje za izbor sklopke, bit će govora kasnije.

Izbor sklopke, međutim, ne vrši se prema rasklopnoj struji, nego prema rasklopnoj snazi koja je definirana rasklopnom strujom i nazivnim naponom mreže u kojoj je ugrađena sklopka. Prema tome je rasklopna snaga definirana izrazom

$$S_1 = I_r V_n \qquad \dots (3.168)$$

rasklopna snaga jednog pola sklopke, jer je V_n fazni napon. Budući da sklopka mora biti dimenzionirana za najveću struju koja se može pojaviti, rasklopnu snagu treba odrediti prema struji u najviše opterećenoj fazi i za najnepovoljniju vrstu kratkog spoja. A budući da svaki od tri pola sklopke mora biti sposoban da prekine tu najveću struju, svaki od njih mora biti i dimenzioniran za rasklopnu snagu koja odgovara najvećoj struji u jednoj od faza, jer u svakoj od faza može doći do najveće struje. Rasklopna snaga sklopke jednaka je dakle

$$S = 3\, I_{r\,max}\, V_n = \sqrt{3}\, I_{r\,max}\, U_n \qquad \dots (3.169)$$

gdje su $I_{r\,max}$ najveća rasklopna struja u bilo kojoj od faza, a U_n linijski nazivni napon mreže. Izraz (3.169) jednak je izrazu za prividnu snagu u trofaznom simetričnom sistemu, a vrijedi tada samo u slučaju kad kroz sve tri faze teku jednake struje. Izraz (3.169) za rasklopnu snagu međutim vrijedi i onda ako samo u jednoj fazi teče struja $I_{r\,max}$, jer je rasklopna snaga sklopke zbroj rasklopnih mogućnosti triju polova, a sva tri pola moraju biti u stanju da prekinu struju $I_{r\,max}$. Snaga S (3.169) mjerodavna je za izbor sklopke.

Rasklopnu snagu obično označavamo u MVA, pa u (3.168) i (3.169) treba uvrstiti struju u kA, a napon u kV.

B. Izbor vrste kratkog spoja za određivanje rasklopne snage

Dijagram na sl. 3.56 prikazuje vrste kratkog spoja u koordinatnom sistemu Z_i/Z_d i Z_i/Z_o za koje se pojavljuju najveće struje, pa može poslužiti pri izboru vrste kratkog spoja mjerodavne za određivanje rasklopne snage.

Ako zanemarimo djelatne otpore te uzmemo u račun početne reaktancije generatora (X_{ig} i X_{dg}''), te reaktancije od priključnica generatora do mjesta kratkog spoja (X_{im} i X_{dm}), omjer $\alpha = Z_i/Z_d$ možemo napisati u obliku

$$\alpha = \frac{Z_i}{Z_d} = \frac{X_i}{X_d''} = \frac{X_{ig} + X_{im}}{X_{dg}'' + X_{dm}} \qquad \dots (3.170)$$

Omjer je $X_{ig}/X_{dg}'' = 1$ za turbogeneratore, dok je za generatore s izrazitim polovima X_{ig}/X_{dg}'' nešto veći od 1, prema relacijama (2.95) i (2.96). Prema tome u slučaju kratkog spoja na sabirnicama generatora možemo

računati da je $\alpha \cong 1$. Takva aproksimacija vrijedi to više, što se između priključnica generatorâ i mjesta kratkog spoja nalazi više reaktancija (vodovi, transformatori), jer su tada X_{im} i X_{dm} sve veći i jer su X_{im} i X_{dm} međusobno jednaki. Prema tome možemo smatrati da, za pretpostavke s kojima se računa rasklopna struja, uvijek vrijedi

$$\alpha = \frac{Z_i}{Z_d} = 1 \qquad \dots (3.171)$$

odnosno da se maksimalna rasklopna struja pojavljuje ili u slučaju tropolnog, ili jednopolnog kratkog spoja (sl. 3.56).

U kojem će slučaju rasklopna struja biti veća u slučaju jednopolnog od one u slučaju tropolnog kratkog spoja ovisi o omjeru $\beta = \frac{Z_i}{Z_o}$. Omjer β možemo — uz zanemarenje djelatnih otpora — definirati relacijom

$$\beta = \frac{Z_i}{Z_o} = \frac{X_i}{X_o} = \frac{X_{ig} + X_{im}}{X_{og} + X_{om}} \qquad \dots (3.172)$$

gdje je X_o nulta reaktancija od nul-tačke generatora do mjesta kratkog spoja, odnosno gdje je X_{og} nulta reaktancija generatora, a X_{om} nulta reaktancija mreže od priključnica generatora do mjesta kratkog spoja. Ako je

$$\beta = \frac{X_{ig} + X_{im}}{X_{og} + X_{om}} > 1 \qquad \dots (3.173a)$$

odnosno — uzevši u obzir (3.171) — ako je

$$\frac{X_d''}{X_o} = \frac{X_{dg}'' + X_{dm}}{X_{og} + X_{om}} > 1 \qquad \dots (3.173b)$$

prilike pri jednopolnom kratkom spoju bit će mjerodavne za određivanje rasklopne snage, jer će se u slučaju jednopolnog kratkog spoja pojaviti veća struja nego u slučaju tropolnog.

Takav zaključak vrijedi samo onda kad se radi o mreži s uzemljenom nul-tačkom. Ako, međutim, nul-tačka nije uzemljena, X_o je vrlo veliko, pa omjer X_d''/X_o teži k nuli. Budući da je $\alpha \cong 1$ (sl. 3.56), za određivanje rasklopne snage mjerodavan je tada samo tropolni kratki spoj.

Rasklopnu snagu za slučaj tropolnog kratkog spoja — uzevši u obzir zanemarenje djelatnog otpora i istosmjerne komponente struje — određujemo iz relacije

$$S_{k3} = \frac{U^2_n}{X_d''} \qquad \dots (3.174)$$

koju dobivamo uvrštavanjem (3.167) u (3.169).

Rasklopna struja za jednopolni kratki spoj određena je relacijom

$$I_{k1}'' = \frac{3\, V_n}{X_d'' + X_i + X_0} \qquad \dots (3.175)$$

dok je rasklopna snaga u tom slučaju — uzevši u obzir (3.169)

$$S_{k1} = \frac{3\,U_n^2}{X_d'' + X_i + X_o} \qquad \ldots (3.176a)$$

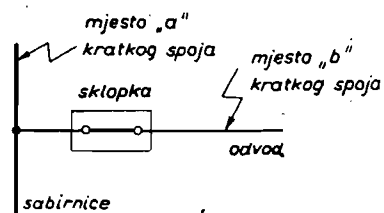
bez obzira na činjenicu — kako je već naglašeno — što struja I_{k1}'' teče samo u jednoj fazi. Kako s dovoljno tačnosti možemo postaviti (3.171) da je $X_d'' = X_i$, izraz za S_{k1} možemo napisati i u obliku

$$S_{k1} = \frac{3\,U_n^2}{2\,X_d'' + X_o} \qquad \ldots (3.176b)$$

što se najčešće upotrebljava u praksi.

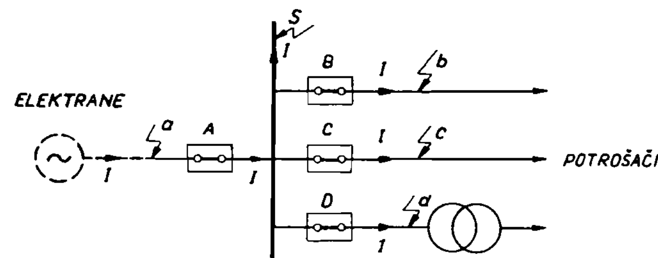
C. Izbor mjesta kratkog spoja za određivanje rasklopne snage sklopke

Sklopka treba da je tako odabrana da bude sposobna isklopiti najveću struju koja se može pojaviti kroz njezine kontakte. Odnosno, sklopka treba da isklopi najveću rasklopnu snagu koja odgovara toj najvećoj struji.

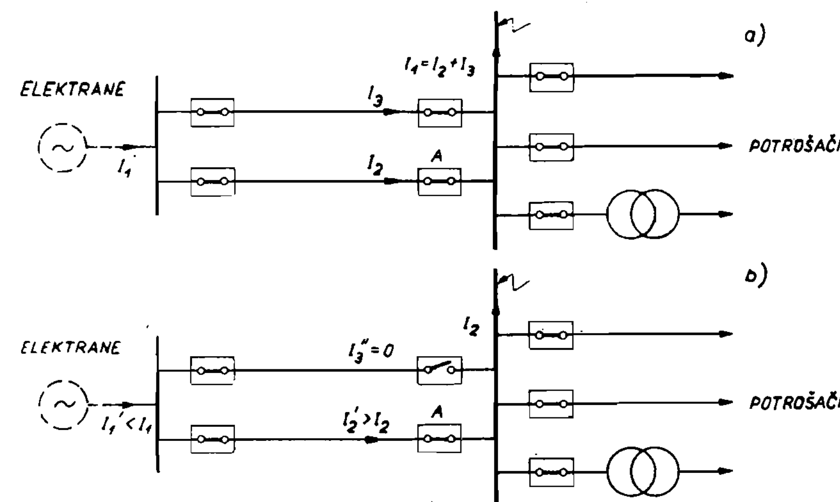


Slika 3.63. Pretpostavljena mjesta kratkog spoja za određivanje rasklopne snage sklopke

Da se odredi najveća rasklopna snaga koja se za promatranu mrežu može pojaviti u promatranom rasklopnom postrojenju, normalno se polazi od pretpostavke da je kratki spoj nastao na sabirnicama rasklopnog postrojenja, za koje želimo odrediti rasklopnu snagu sklopki. Kao mjerodavnu uzet ćemo najveću rasklopnu snagu između onih koje smo odredili za prilike u doba velikih i malih voda u hidroelektranama, te za slučaj tropolnog i jednopolnog kratkog spoja.



Slika 3.64. Mjesto kratkog spoja za određivanje rasklopne snage sklopke u odvodima koji opskrbljuju potrošače



Slika 3.65. Slučaj kratkog spoja na sabirnicama za dvostruki vod napajan s jedne strane

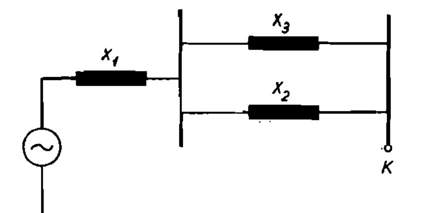
Tako određena rasklopna struja (rasklopna snaga) ne protječe kroz sve sklopke promatranog rasklopnog postrojenja, iako je ona najveća rasklopna struja koja se pojavljuje u dotičnom postrojenju. Radi toga pri određivanju rasklopne snage sklopke treba jednom pretpostaviti da je kratki spoj nastao na sabirnicama rasklopnog postrojenja (kratki spoj na mjestu a — sl. 3.63) u kojemu se nalazi promatrana sklopka, a drugi put da je nastao na odvodu neposredno pored sklopke, ali na suprotnoj strani sabirnica (kratki spoj na mjestu b — sl. 3.63).

Promotrimo nekoliko tipičnih situacija koje se pojavljuju u mrežama.

Za sklopke B, C i D na sl. 3.64, koje se nalaze u vodovima ili u transformatorskim odvodima preko kojih se samo snabdijevaju potrošači odnosno na koje nisu priključeni ni generatori ni sinhroni motori (ili sinhroni kompenzatori), ima smisla promatrati jedino kratki spoj na mjestima b, c i d, jer samo u slučaju kratkog spoja na odvodu, struja kratkog spoja protječe kroz sklopku. No i pored toga dovoljno je pretpostaviti da je kratki spoj nastao na sabirnicama (s na sl. 3.64). Veličina struje kratkog spoja neće se naime promijeniti ni uz pretpostavku da je kratki spoj nastao na sabirnicama (s) ili u neposrednoj blizini sklopke na strani odvoda (b, c ili d), jer je reaktancija između sabirnica i mjesta b, c i d zanemarivo malena. Treba napomenuti da se struje ucrtane na sl. 3.64. ne pojavljuju istovremeno. I za sklopku A u dovodnom vodu najveća će se struja pojaviti uz pretpostavku kratkog spoja na sabirnicama za slučaj kad se napajanje vrši jednim vodom.

Nešto je drukčija situacija ako se rasklopno postrojenje napaja preko dva voda (sl. 3.65). U slučaju kratkog spoja na sabirnicama, uz uključena oba voda (sl. 3.65a), od ukupne struje koja protječe kroz sabirnice

$I_2 + I_3$ samo dio I_2 protječe kroz sklopku A. Postavlja se pitanje da li je moguće zamisliti situaciju u mreži pri kojoj bi uz kratki spoj na istim sabirnicama potekla kroz sklopku A veća struja? Takva situacija nastaje kad zamislimo da je vod, paralelan s vodom u kojemu se nalazi sklopka A, isklopljen (sl. 3.65b). Tada kroz sklopku A protječe struja I_2', koja je veća od struje I_2 na sl. 3.65a. Struja I_2 prema ekvivalentnoj shemi — za slučaj tropolnog kratkog spoja — na sl. 3.66. iznosi



Slika 3.66. Ekvivalentna shema spoja za slučaj kratkog spoja na sabirnicama u shemi spoja na sl. 3.65.

$$I_2 = \frac{V}{\frac{X_1 X_2}{X_3} + X_1 + X_2} \quad \ldots (3.177)$$

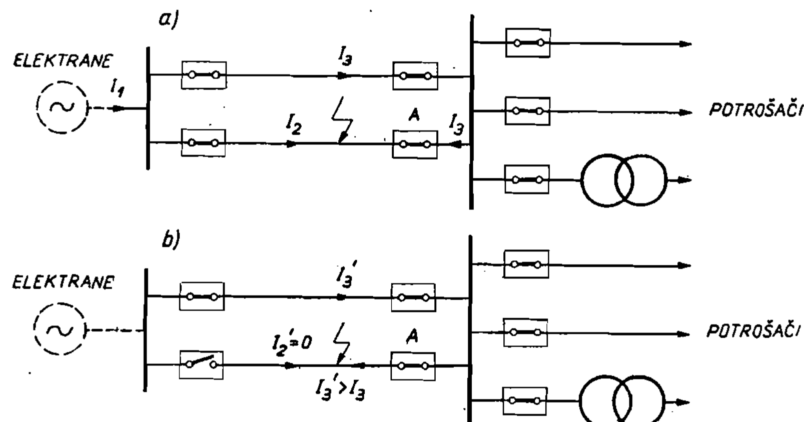
dok je struja I_2' uz $X_3 = \infty$

$$I_2' = \frac{V}{X_1 + X_2} \quad \ldots (3.178)$$

Prema tome je uvijek

$$I_2' > I_2 \quad \ldots (3.179)$$

U slučaju kratkog spoja na strani odvoda (sl. 3.67), kad su oba voda uklopljena (sl. 3.67a), kroz sklopku A protječe struja I_3, jer se mjesto



Slika 3.67. Slučaj kratkog spoja na strani odvoda za dvostruki vod napajan s jedne strane

kratkog spoja napaja sa dviju strana. Ako zamislimo da je za isto mjesto kratkog spoja sklopka na drugom kraju voda isklopljena, kroz sklopku A protjecat će struja I_3' (sl. 3.67b). Struju I_3 možemo odrediti i prema shemi na sl. 3.66, što iznosi

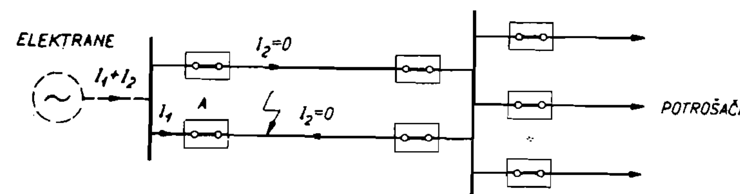
$$I_3 = \frac{V}{\frac{X_1 X_3}{X_2} + X_1 + X_3} \quad \ldots (3.180)$$

Struja I_3' iznosi

$$I_3' = \frac{V}{X_1 + X_3} \quad \ldots (3.181)$$

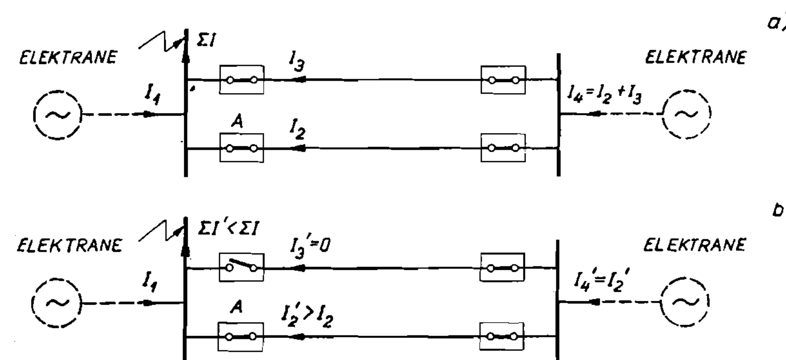
pa je uvijek

$$I_3' > I_3 \quad \ldots (3.182)$$



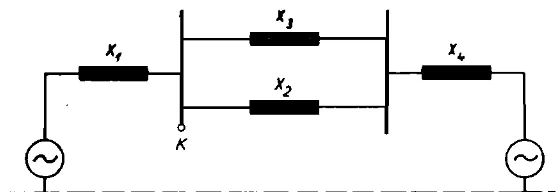
Slika 3.68. Struja kroz sklopku na početku dvostrukog voda napajanog s jedne strane

Prema tome kad postoji dvostruki vod napajan s jedne strane uvijek će se — uz shemu spoja prikazanu na sl. 3.65 — veća rasklopna struja dobiti ako se pretpostavi da je jedan od vodova isklopljen. Unaprijed se međutim ne može reći da li će struja kratkog spoja biti veća u slučaju kratkog spoja na sabirnicama ili na strani odvoda, jer ovisi o reaktancijama pojedinih vodova.



Slika 3.69. Slučaj kratkog spoja na sabirnicama za dvostruki vod napajan s dvije strane

Izloženo vrijedi za sklopke na kraju dvostrukog voda, dok sklopke na početku dvostrukog voda treba smatrati sklopkama na vodovima koji opskrbljuju potrošače. Struja kroz sklopku koja protječe u slučaju kratkog spoja na strani odvoda (sl. 3.68) jednaka je naime struji kratkog spoja na sabirnicama.



Slika 3.70. Ekvivalentna shema spoja za slučaj kratkog spoja na sabirnicama u shemi na sl. 3.69.

Shema spoja dvostrukog voda napajanog sa dvije strane prikazana je na sl. 3.69. Ako se pojavi kratak spoj na sabirnicama i ako su sve sklopke uključene, kroz sklopku A protjecat će dio struje (I_2) iz elektrana koje se nalaze na strani sklopke (sl. 3.69a). Ako je, međutim, isklopljen vod u kojemu se ne nalazi promatrana sklopka, kroz sklopku A protjecat će ukupna struja kratkog spoja koju daju elektrane na strani sklopke (I_2'). Naravno da je ukupna struja ($I_2 + I_3$) iz spomenutih elektrana u prvom slučaju (oba voda uključena) veća od struje (I_2') u drugom slučaju (jedan vod isključen), ali je u drugom slučaju struja kroz sklopku A ipak veća. Iz ekvivalentne sheme (sl. 3.70) možemo naime odrediti da je

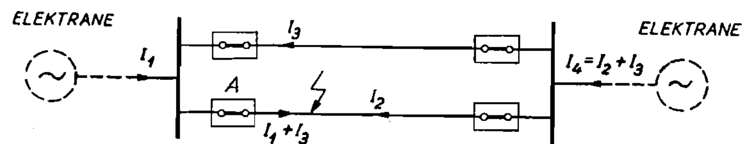
$$I_2 = \frac{V}{\frac{X_2 X_4}{X_3} + X_2 + X_4} \qquad \ldots (3.182)$$

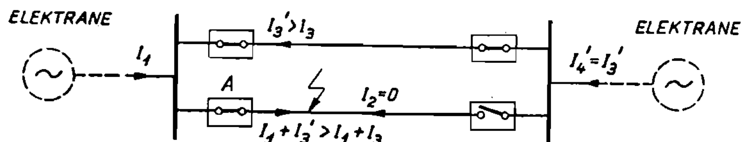
te da je

$$I_2' = \frac{V}{X_2 + X_4} \qquad \ldots (3.183)$$

pa je

$$I_2' > I_2 \qquad \ldots (3.184)$$





Slika 3.71. Slučaj kratkog spoja na strani odvoda za dvostruki vod napajan s dvije strane

U slučaju kratkog spoja na strani odvoda (sl. 3.71) kroz sklopku A protjecat će struja iz elektrana sa strane sabirnica (I_1) i struja iz elektrana na strani sklopke (I_3 odnosno I_3'). Ako pretpostavimo da su oba voda uključena (sl. 3.71a), kroz sklopku A protjecat će struja $I_1 + I_3$, koju određujemo prema ekvivalentnoj shemi na sl. 3.70,

$$I_1 + I_3 = \frac{V}{X_1} + \frac{V}{\frac{X_3 X_4}{X_2} + X_3 + X_4} \qquad \ldots (3.184)$$

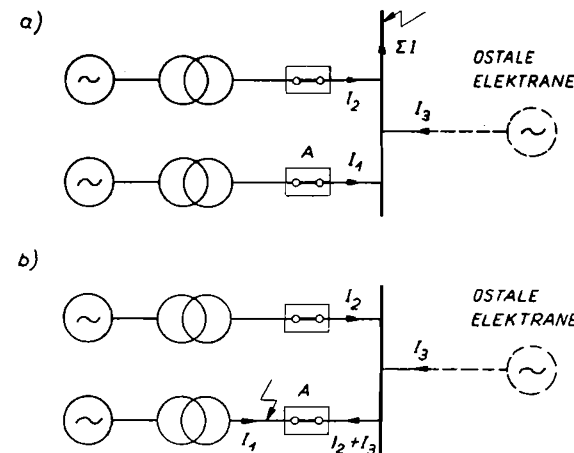
Uz pretpostavku da je drugi vod isklopljen (sl. 3.71b), kroz sklopku A protjecat će struja $I_1 + I_3'$, koja iznosi

$$I_1 + I_3' = \frac{V}{X_1} + \frac{V}{X_3 + X_4} \qquad \ldots (3.185)$$

Dakle je uvijek

$$I_1 + I_3' > I_1 + I_3 \qquad \ldots (3.186)$$

Prema tome i u slučaju napajanja dvostrukog voda sa dvije strane, veća struja kratkog spoja kroz sklopke pojavljivat će se ako pretpostavimo da je u trenutku kratkog spoja jedan od vodova isključen. Da li će se veća struja kratkog spoja pojaviti ako se pretpostavi da je kratki spoj nastao na sabirnicama ili pak na strani odvoda ne može se unaprijed reći, jer to ovisi o veličini reaktancija.



Slika 3.72. Pretpostavljena mjesta kratkog spoja za određivanje rasklopne snage sklopke u elektrani

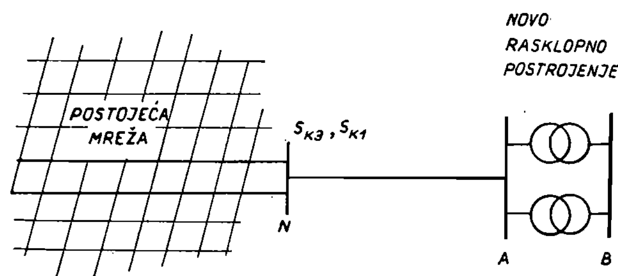
Na sl. 3.72 prikazana je još jedna tipična shema spoja, koja može dobro poslužiti kao ilustracija određivanja rasklopne snage sklopke s obzirom na pretpostavku o mjestu kratkog spoja. Promotrimo struje koje protječu kroz sklopku A. Ako pretpostavimo da je kratki spoj nastao na sabirnicama (sl. 3.72a), kroz sklopku A protjecat će dio struje I_1 koju proizvodi generator, koji je priključen preko sklopke A na sabirnice. Ako međutim zamislimo da je kratki spoj nastao pored sklopke na strani generatora, kroz sklopku A protjecat će struja iz drugog generatora I_2

(ili iz drugih generatora, ako ih ima više od dva u promatranoj elektrani) te iz ostalih elektrana koje postoje u elektroenergetskom sistemu (I_3). Pri izboru sklopke mjerodavna je, naravno, veća struja. Ako se radi o elektrani s generatorima jednakih karakteristika, uvijek će kroz sklopke koje spajaju generatore sa sabirnicama poteći veća struja, ako se računa s kratkim spojem na strani generatora (sl. 3.72b). Za generatore različitih karakteristika to nije moguće unaprijed reći, jer to ovisi o karakteristikama pojedinih generatora i udjelu ostale mreže u struji kratkog spoja.

Normirane rasklopne snage sklopaka međusobno se znatno razlikuju (npr. za napon 30 kV postoje sklopke rasklopne snage 400, 600 i 1000 MVA), pa je često puta evidentno da je dovoljno provesti račun samo za slučaj kratkog spoja na sabirnicama. Osim toga često se u praksi nastoji u isto rasklopno postrojenje postaviti jednake sklopke radi omogućavanja njihove međusobne zamjene, pa je u tom slučaju dovoljno odrediti rasklopnu snagu sklopke kroz koju će protjecati najveća struja kratkog spoja. Normalno je sklopka preko koje se opskrbljuju potrošači ona, kroz koju protječu najveće struje kratkog spoja, bez obzira na snagu koju traže potrošači u normalnom pogonu. U nekim slučajevima, međutim, neophodno je provesti račun kratkog spoja uzimajući u obzir njegovo mjesto, kad postoji mogućnost da se takvim računima pokaže, kako je moguće postaviti sklopke manje normirane rasklopne snage.

D. Određivanje rasklopne snage u dijelu mreže

Prilikom projektiranja novog rasklopnog postrojenja, koje će biti priključeno na postojeću mrežu, treba odrediti i struje kratkog spoja. Ukoliko je račun kratkog spoja za postojeću mrežu već proveden (takvi računi normalno se periodički provode), mogu se korištenjem tih podataka odrediti struje kratkog spoja i u novom rasklopnom postrojenju.



Slika 3.73. Shema priključka novog rasklopnog postrojenja na sabirnice N postojeće mreže

Neka je npr. potrebno projektirati novo rasklopno postrojenje (sl. 3.73) koje će vodom određene duljine i presjeka biti priključeno na postojeće sabirnice N u postojećoj mreži. Iz računa kratkog spoja za mrežu poznato je da je u slučaju kratkog spoja na sabirnicama N rasklopna snaga za tropolni kratki spoj S_{k3}, a za jednopolni S_{k1}. Poznavanjem tih dviju veličina mogu se odrediti direktna i nulta reaktancija cijele mreže. Direktna (X_{dn}'') i nulta reaktancija (X_{on}) određena iz rasklopnih snaga, predstavljaju reaktancije koje zamjenjuju cijelu postojeću mrežu, odnosno to su reaktancije do kojih bismo došli kad bismo proveli sva pojednostavnjenja (paralelno spajanje i transformacije) mreže i cijelu mrežu sveli na jednu reaktanciju (kako je to npr. učinjeno na sl. 3.5. za mrežu na sl. 3.4). Iz (3.174) možemo odrediti reaktanciju X_{dn}'', koja je

$$X_{dn}'' = \frac{U^2_n}{S_{k3}} \qquad \ldots (3.187)$$

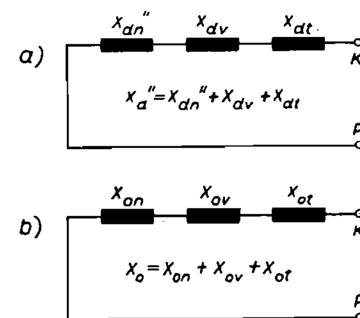
dok iz (3.176b) određujemo zbroj dvostruke reaktancije X_{dn}'' (uz pretpostavku da je direktna jednaka inverznoj reaktanciji) i reaktancije X_{on}, pa je

$$2\,X_{dn}'' + X_{on} = \frac{3\,U^2_n}{S_{k1}} \qquad \ldots (3.188)$$

Uvrštavanjem X_{dn}'' iz (3.187) u (3.188) dobivamo

$$X_{on} = U^2_n \left(\frac{3}{S_{k1}} - \frac{2}{S_{k3}} \right) \qquad \ldots (3.189)$$

Poznajemo li X_{dn}'' i X_{on} za postojeću mrežu, te direktne i nulte reaktancije novog voda (X_{dv} i X_{ov}) i paralelno spojenih transformatora (X_{dt} i X_{ot}), određujemo ekvivalentne sheme mreže (sl. 3.74) do mjesta kratkog spoja (sabirnice B na sl. 3.73). Zbroj triju reaktancija na sl. 3.74a u promatranom slučaju jest direktna (X_d''), a na sl. 3.74b nulta reaktancija X_o za određivanje rasklopne snage na sabirnicama B prema relaciji (3.174), odnosno (3.176b).



Slika 3.74. Ekvivalentne sheme spoja za određivanje rasklopne snage na sabirnicama B novog rasklopnog postrojenja prikazanog na sl. 3.73.

Ako nam, međutim, nisu poznate rasklopne snage S_{k1} i S_{k3} u postrojenju na koje se vrši priključak novog dijela mreže, možemo poći od pretpostavke da su rasklopne snage u slučaju kratkog spoja na tim sabirnicama jednake rasklopnim snagama sklopaka koje su ugrađene u rasklopno postrojenje. Na taj način nalazimo se na strani sigurnosti s obzirom na rasklopne snage u novoizgrađenom dijelu mreže.

Još nepovoljniju osnovu za račun dobivamo ako pretpostavimo da je reaktancija postojeće mreže zanemarivo malena ($X_{dn}'' = 0$ i $X_{on} = 0$).

Rasklopna snaga izračunata uz tu pretpostavku uvijek je veća od stvarne, pa bi to često dovodilo do izbora sklopaka s prevelikom rasklopnom snagom. Takvu pretpostavku, međutim, možemo prihvatiti samo onda kad se radi o određivanju rasklopne snage na sekundarnoj strani transformatora male snage, koji je priključen na relativno veliku mrežu. Ako se npr. radi o transformatoru snage 600 kVA prenosnog omjera 30/10 kV i napona kratkog spoja od 6%, njegova reaktancija na naponu 10 kV iznosi

$$X_{dt} = \frac{6}{100} \cdot \frac{10^2}{0,6} = 10,0\ \Omega$$

Rasklopna snaga mreže na sabirnicama, na koje treba priključiti transformator, iznosi $S_{k3} = 400$ MVA, pa je reaktancija mreže (3.187) preračunata na 10 kV

$$X_{dn}'' = \frac{10^2}{400} = 0,25\ \Omega$$

Prema tome rasklopna snaga na sekundarnoj strani transformatora iznosi

$$S_{k3} = \frac{U_n^2}{X_{dn}'' + X_{dt}} = \frac{10^2}{0,25 + 10,0} = 9,76 \text{ MVA}$$

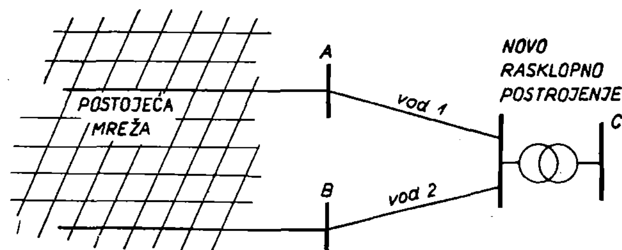
Ako se zanemari reaktancija mreže ($X_{dn}'' = 0$) doći će se do rasklopne snage

$$S_{k3} = \frac{U^2_n}{X_{dt}} = \frac{10^2}{10} = 10,00 \text{ MVA}$$

Zanemarenje reaktancije mreže je opravdano to više, što je veća reaktancija novog dijela mreže i što je veća rasklopna snaga na mjestu priključka.

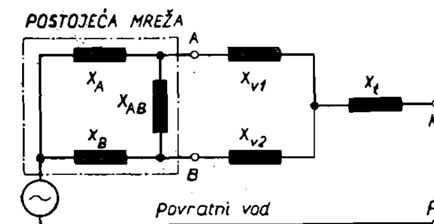
Zamjena utjecaja mreže jednom reaktancijom (jednom u direktnom, a jednom u nultom sistemu) moguća je samo onda kad je novi dio mreže priključen tek na jednom mjestu na postojeću mrežu. Ako se novi dio mreže napaja iz n tačaka mreže, postojeću mrežu treba nadomjestiti sa

$$\frac{n\,(n+1)}{2} \qquad \ldots (3.190)$$



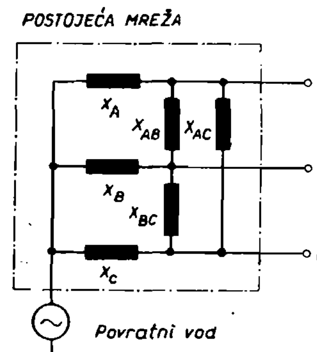
Slika 3.75. Shema spoja novog rasklopnog postrojenja dvama novim vodovima na dvije sabirnice (A i B) postojeće mreže

reaktancija, koje spajaju sve tačke napajanja međusobno i sve tačke napajanja s povratnim vodom. Ako npr. treba odrediti struje kratkog spoja u slučaju kratkog spoja na sabirnicama C (sl. 3.75) novog rasklopnog postrojenja, koje je na postojeću mrežu priključeno preko sabirnica A i B, postojeću mrežu treba zamijeniti sa tri reaktancije: X_A između sabirnica A i povratnog voda, X_B između sabirnica B i povratnog voda, te X_{AB} između sabirnica A i B (sl. 3.76). Postojeća mreža zamijenjena je sa tri



Slika 3.76. Ekvivalentna shema za određivanje rasklopne snage na sabirnicama prema shemi spoja sa sl. 3.75.

reaktancije, što odgovara relaciji (3.190), jer postoje dvije ($n = 2$) pojne tačke za novu mrežu. Određivanje tih reaktancija provodi se postepenim pojednostavnjivanjem mreže, jer se te reaktancije ne mogu odrediti iz podataka o rasklopnim snagama u slučaju kratkog spoja na sabirnicama A i B.



Slika 3.77. Nadoknadna shema postojeće mreže za slučaj da se novi dio napaja iz tri tačke (A, B i C)

Ako se novo rasklopno postrojenje napaja iz tri tačke (A, B i C na sl. 3.77), postojeću mrežu treba zamijeniti sa šest reaktancija.

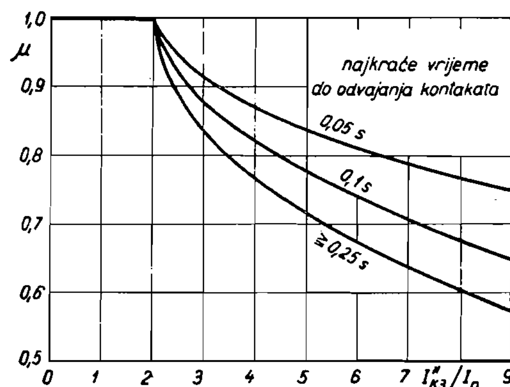
E. Propisi za određivanje rasklopne struje

Po njemačkim propisima (Lit. 20) rasklopna struja računa se prema izrazu

$$I_{rK3} = \mu\, \frac{1,1\, V_n}{X_d''} \qquad \ldots (3.191)$$

jer se prema njemačkim propisima računa sa 10% višim naponom od nazivnog, kako je spomenuto u 3.4C. Veličina μ ovisi o najkraćem vre-

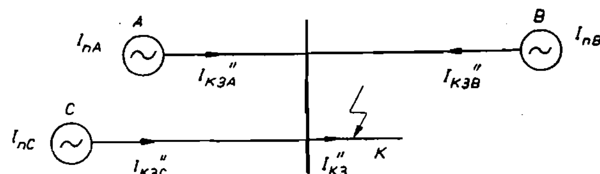
menu koje će proteći od nastanka kratkog spoja do trenutka odvajanja kontakata i o omjeru između struje kratkog spoja koju daje generator i nazivne struje generatora. Ovisnost veličine μ o navedenim veličinama prikazana je na sl. 3.78.



Slika 3.78. Ovisnost veličine μ o omjeru struje kratkog spoja i nazivne struje za različita najkraća vremena od nastanka kratkog spoja do odvajanja kontakata.

Treba napomenuti da u vrijeme od nastanka kratkog spoja do trenutka odvajanja kontakata ne treba uračunavati udešeno vremensko zatezanje releja (koje je potrebno radi selektivnosti zaštite), jer sklopka treba da bude sposobna da prekine struju i u najkraćem mogućem vremenu.

Osim toga treba naglasiti da je za određivanje veličine μ potrebno uzeti u obzir raspodjelu struje kratkog spoja na pojedine generatore i na osnovu te raspodjele odrediti omjer između struje kratkog spoja i nazivne struje generatora. Da bismo ilustrirali postupak, poslužimo se jednostavnom shemom prikazanom na sl. 3.79. Na već opisani način naj-



Slika 3.79. Raspodjela struje kratkog spoja na generatore radi određivanja veličine μ.

prije se određuje nadoknadna reaktancija mreže (X_d'') od nul-tačke generatora do mjesta kratkog spoja, a zatim struja na mjestu kratkog spoja — ne uzimajući u obzir veličinu μ — prema relaciji

$$I_{K3}'' = \frac{1{,}1\, V_n}{X_d''} \qquad \ldots (3.192)$$

Poznavajući ukupnu struju i reaktancije mreže, moguće je odrediti udio svakog od generatora u napajanju mjesta kratkog spoja (I_{K3A}'', I_{K3B}'' i

I_{K3C}'', na sl. 3.79). Tada se za svaki generator posebno (ili za sve u jednoj elektrani, ako su svi istih karakteristika) određuje omjer između navedene struje kratkog spoja i nazivne struje (I_{nA}, I_{nB} i I_{nC} na sl. 3.79). Pomoću tih omjera i najkraćeg vremena do otvaranja kontakata sklopke, kroz koje protječe ukupna struja kratkog spoja, a na osnovu dijagrama sa sl. 3.78, određuje se veličina μ za svaki generator (μ_A prema omjeru I_{K3A}''/I_{nA}, μ_B prema omjeru I_{K3B}''/I_{nB} itd.). Rasklopna snaga za sklopku na mjestu kratkog spoja sada se može odrediti iz relacije

$$I_{rK3} = \sum_{1}^{s} \mu_s I_{K3s}'' = \mu_A I_{K3A}'' + \mu_B I_{K3B}'' + \mu_C I_{K3C}'' \qquad \ldots (3.193)$$

Sve navedeno vrijedi za tropolni kratki spoj. Za jednopolni kratki spoj rasklopna struja određuje se prema njemačkim propisima, iz izraza

$$I_{rK1} = \frac{1{,}1 \cdot 3\, V_n}{X_d'' + X_i + X_o} \qquad \ldots (3.194)$$

dakle i opet se računa sa 10% povišenim naponom, ali se ne uzima u obzir veličina μ (odnosno pretpostavlja se da je uvijek $\mu = 1$), jer je vremenska konstanta struje jednopolnog kratkog spoja znatno veća od vremenske konstante tropolnog kratkog spoja.

Rasklopna snaga određuje se iz relacije (3.169).

U rasklopnoj struji određenoj prema njemačkim propisima nije uzet u obzir utjecaj istosmjerne komponente struje kratkog spoja. Nasuprot tome američki propisi (Lit. 21) uzimaju u račun taj utjecaj, ali ne pretpostavljaju da je napon za 10% viši od nazivnog. Rasklopna struja tropolnog kratkog spoja određuje se dakle iz relacije

$$I_{rK3} = \nu \frac{V_n}{X_d''} \qquad \ldots (3.195)$$

gdje je ν veličina ovisna o vremenu isklapanja sklopke. Pod vremenom isklapanja sklopke razumijeva se vrijeme od trenutka kad je narinut pun napon na svitak za isklapanje sklopke do prekidanja struje kratkog spoja. Američki propisi razlikuju slijedeća vremena isklapanja: 2 periode (0,033 sek), 3 periode (0,05 sek), 5 perioda (0,083 sek) i 8 perioda (0,133 sek). Vrijeme isklapanja u periodama vrijedi za frekvenciju 60 Hz. Za sklopke s navedenim vremenima isklapanja vrijeme od nastanka kratkog spoja do odjeljivanja kontakata ne smije biti manje od 1, 2, 3, odnosno 4 periode (0,0165; 0,033; 0,05, odnosno 0,067 sek.). Veličina ν iznosi

vrijeme isklapanja	ν
2 periode (0,033 sek)	1,4
3 periode (0,050 sek)	1,2
5 perioda (0,083 sek)	1,1
8 perioda (0,133 sek)	1,0

Za sklopke generatorskog napona, ako rasklopna struja prije množenja sa ν (dakle određena iz omjera V_n/X_d'') daje rasklopnu snagu veću od 500 MVA, treba primijeniti veću vrijednost ν i to — ovisno o vremenu isklapanja

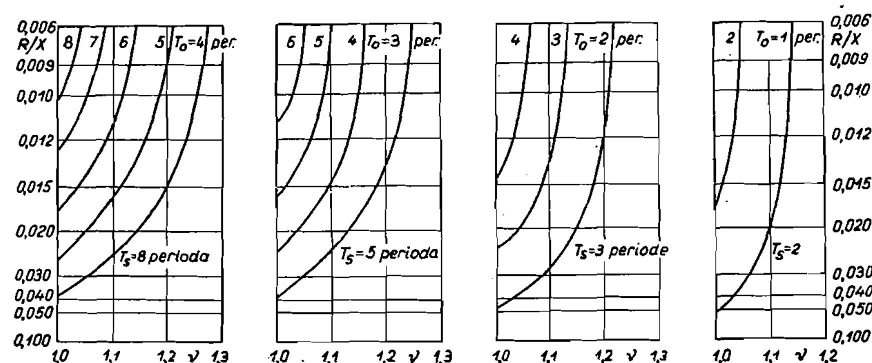
vrijeme isklapanja	ν
2 periode (0,033 sek)	1,5
3 periode (0,050 sek)	1,3
5 perioda (0,083 sek)	1,2
8 perioda (0,133 sek)	1,1

Za jednopolni kratki spoj rasklopna struja određuje se iz relacije

$$I_{rK1} = \nu \frac{3\, V_n}{2\, X_d'' + X_o} \qquad \ldots (3.196)$$

gdje ν ima iste vrijednosti kao za tropolni kratki spoj.

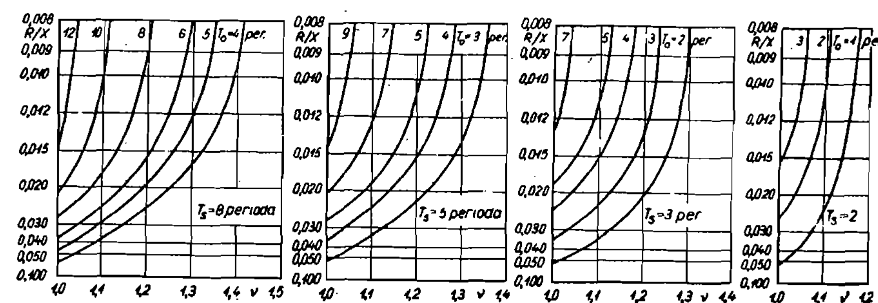
U prijedlogu za izmjenu američkog standarda (Lit. 22) uveden je utjecaj vremenske konstante istosmjerne komponente struje kratkog spoja, te utjecaj vremena od nastanka kratkog spoja do odvajanja kontakata (vrijeme odvajanja kontakata) na veličinu ν. Taj utjecaj prikazan je na sl. 3.80 do 3.82, na kojima je vremenska konstanta karakterizirana omjerom R/X. Poznavajući dakle vrijeme isklapanja sklopke (T_S na sl. 3.80. do 3.82), vrijeme odvajanja kontakta (T_o), omjer R/X i položaj mjesta kratkog spoja u odnosu na generatore, može se iz dijagrama sa sl. 3.80. do 3.82. odrediti veličina ν, a pomoću nje iz formula (3.195) i (3.196) rasklopne struje.



T_s vrijeme isklapanja sklopke
T_o vrijeme odvajanja kontakata
ν veličina iz relacije (3.195)
R djelatni otpor } od nul-tačke generatora
X reaktancija } do mjesta kratkog spoja

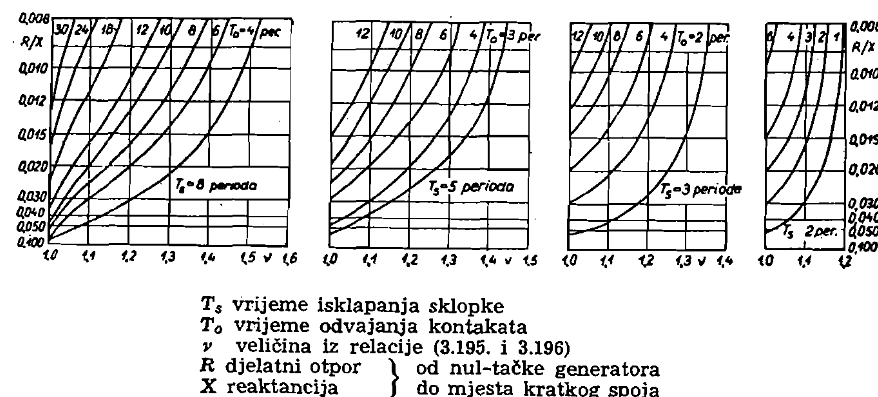
Slika 3.80. Dijagrami za određivanje veličine ν za rasklopnu struju tropolnog kratkog spoja koja protječe kroz najviše jednu transformaciju

Prijedlog za izmjenu američkih propisa u znatnoj mjeri ublažava zahtjeve, jer za sve sklopke koje su samo nešto više udaljene od generatora doći će se do omjerâ R/X većih od 0,1, pa će postati ν = 1,0.



T_s vrijeme isklapanja sklopke
T_o vrijeme odvajanja kontakata
ν veličina iz relacije (3.196)
R djelatni otpor } od nul-tačke generatora
X reaktancija } do mjesta kratkog spoja

Sleka 3.81. Dijagrami za određivanje veličine ν za rasklopnu struju jednopolnog kratkog spoja, koja protječe kroz najviše jednu transformaciju



T_s vrijeme isklapanja sklopke
T_o vrijeme odvajanja kontakata
ν veličina iz relacije (3.195. i 3.196)
R djelatni otpor } od nul-tačke generatora
X reaktancija } do mjesta kratkog spoja

Slika 3.82. Dijagrami za određivanje veličine ν za rasklopnu struju tropolnog i jednopolnog kratkog spoja koje protječu kroz dvije ili više transformacija

3.6. STRUJA MJERODAVNA ZA UGRIJAVANJE ZA VRIJEME TRAJANJA KRATKOG SPOJA

A. Određivanje struje mjerodavne za ugrijavanje

Struja mjerodavna za ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkog spoja efektivna je vrijednost struje kratkog spoja, jer je efektivna vrijednost izmjenične struje tolika, da bi proizvela istu toplinu kao istosmjerna struja iste veličine. Efektivna vrijednost izmjenične struje definirana je relacijom

$$I^2 = \frac{1}{t}\int_0^t i^2\,dt \qquad \dots (3.197)$$

gdje je I efektivna vrijednost struje, i momentana, dok je t vrijeme promatranja. Za sinusnu struju konstantne amplitude, ako integriramo u granicama od 0 do $t = \frac{n}{4f}$ (gdje je n cijeli broj, a f frekvencija), dobivamo da je $I = I_m/\sqrt{2}$, gdje je I_m tjemena vrijednost izmjenične struje. Momentana vrijednost određena je naime relacijom $i = I_m \sin \omega t$. Efektivna vrijednost izmjenične struje konstantne amplitude nije dakle funkcija vremena t, ako promatramo krajem svake četvrtine periode, a manje vremensko razdoblje nije za praksu ni od kakva značenja.

Struja kratkog spoja, međutim, nije izmjenična struja konstantne amplitude, jer se njezina veličina s vremenom mijenja, pa efektivna vrijednost takve struje nije neovisna o trajanju promatranja i kad bismo se ograničili na četvrtinu periode ili njezine višekratnike. Radi toga je potrebno — da bismo odredili efektivnu struju kratkog spoja — uzeti u obzir njezine promjene od trenutka nastanka do prekida struje kratkog spoja.

Pođimo zato od relacije za momentanu vrijednost struje kratkog spoja. Uz pretpostavku da kratki spoj nastane u momentu kad je napon jednak nuli, momentane vrijednosti određujemo iz relacije (3.134). U većini praktičkih slučajeva možemo impedancije zamijeniti reaktancijama, pa relacija (3.134) glasi

$$i = -V_m \left\{\left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'}\right) e^{-t/T_{dm}''} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d}\right) e^{-t/T_{dm}'} + \frac{1}{X_d}\right] \sin(\omega t - \varphi) + \frac{1}{X_d''} e^{-t/T_{am}} \sin\varphi\right\} \qquad \dots (3.198)$$

Ako uzmemo u obzir da je efektivna vrijednost prve poluperiode izmjenične komponente struje kratkog spoja (kad ne bi bilo prigušenja) jednaka

$$I_d'' = \frac{V_m}{\sqrt{2}\,X_d''} \qquad \dots (3.199)$$

možemo za (3.198) napisati

$$i = -I_d'' \sqrt{2} \left\{\left[\left(1 - \frac{X_d''}{X_d'}\right) e^{-t/T_{dm}''} + \left(\frac{X_d''}{X_d'} - \frac{X_d''}{X_d}\right) e^{-t/T_{dm}'} + \frac{X_d''}{X_d}\right] \sin(\omega t - \varphi) + e^{-t/T_{am}} \sin\varphi\right\} \qquad \dots (3.200)$$

Uvedimo odnose

$$\sigma = \frac{X_d}{X_d''} \qquad \dots (3.201a)$$

$$\sigma' = \frac{X_d'}{X_d''} \qquad \dots (3.201b)$$

a za recipročne vrijednosti vremenskih konstanata — uvaživši relacije (3.136) i (3.201) — uvedimo oznake

$$\alpha = \frac{1}{T_{dm}''} = \frac{1}{T_{do}''}\frac{X_d'}{X_d''} = \frac{\sigma'}{T_{do}''} \qquad \dots (3.202a)$$

$$\beta = \frac{1}{T_{dm}'} = \frac{1}{T_{do}'}\frac{X_d}{X_d'} = \frac{1}{T_{do}'}\frac{X_d}{X_d''}\frac{X_d''}{X_d'} = \frac{\sigma}{\sigma'}\frac{1}{T_{do}'} \qquad \dots (3.202b)$$

$$\gamma = \frac{1}{T_{am}} = \frac{\omega R}{X_d''} \qquad \dots (3.202c)$$

Tada (3.200) možemo napisati u obliku

$$i = -I_d'' \sqrt{2} \left\{\left[\left(1 - \frac{1}{\sigma'}\right) e^{-\alpha t} + \left(\frac{1}{\sigma'} - \frac{1}{\sigma}\right) e^{-\beta t} + \frac{1}{\sigma}\right] \sin(\omega t - \varphi) + e^{-\gamma t} \sin\varphi\right\} \qquad \dots (3.203)$$

Uvrštavanjem (3.203) u (3.197) dobivamo izraz za efektivnu vrijednost struje kratkog spoja, odnosno za struju I_t mjerodavnu za ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkog spoja. Kvadrat omjera struje mjerodavne za ugrijavanje I_t i struje I_d'' (3.199) iznosi, dakle

$$\left(\frac{I_t}{I_d''}\right)^2 = \frac{2}{t}\int_0^t \left\{\left[\left(1 - \frac{1}{\sigma'}\right) e^{-\alpha t} + \left(\frac{1}{\sigma'} - \frac{1}{\sigma}\right) e^{-\beta t} + \frac{1}{\sigma}\right] \sin(\omega t - \varphi) + e^{-\gamma t} \sin\varphi\right\}^2 dt \qquad \dots (3.204)$$

Kvadriranjem izraza u vitičastoj zagradi dolazimo do relacije koja je osnova daljnjim razmatranjima

$$\left(\frac{I_t}{I_d''}\right)^2 = \frac{2}{t}\left(1-\frac{1}{\sigma'}\right)^2 \int_0^t e^{-2\alpha t} \sin^2(\omega t-\varphi)\,dt +$$

$$+\frac{2}{t}\left(\frac{1}{\sigma'}-\frac{1}{\sigma}\right)^2 \int_0^t e^{-2\beta t} \sin^2(\omega t-\varphi)\,dt + \frac{2}{t}\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 \int_0^t \sin^2(\omega t-\varphi)\,dt +$$

$$+\frac{2}{t}\sin^2\varphi \int_0^t e^{-2\gamma t}\,dt + \frac{4}{t}\left(1-\frac{1}{\sigma'}\right)\left(\frac{1}{\sigma'}-\frac{1}{\sigma}\right) \int_0^t e^{-(\alpha+\beta)t} \sin^2(\omega t-\varphi)\,dt +$$

$$+\frac{4}{t}\left(1-\frac{1}{\sigma'}\right)\frac{1}{\sigma} \int_0^t e^{-\alpha t} \sin^2(\omega t-\varphi)\,dt +$$

$$+\frac{4}{t}\left(1-\frac{1}{\sigma'}\right)\sin\varphi \int_0^t e^{-(\alpha+\gamma)t} \sin(\omega t-\varphi)\,dt +$$

$$+\frac{4}{t}\left(\frac{1}{\sigma'}-\frac{1}{\sigma}\right)\frac{1}{\sigma} \int_0^t e^{-\beta t} \sin^2(\omega t-\varphi)\,dt +$$

$$+\frac{4}{t}\left(\frac{1}{\sigma'}-\frac{1}{\sigma}\right)\sin\varphi \int_0^t e^{-(\beta+\gamma)t} \sin(\omega t-\varphi)\,dt +$$

$$+\frac{4}{t}\frac{1}{\sigma}\sin\varphi \int_0^t e^{-\gamma t} \sin(\omega t-\varphi) \qquad \dots (3.205)$$

U (3.205) dolaze dvije veličine σ i σ', koje nisu međusobno nezavisne. Reaktancije kojima su definirani omjeri σ i σ' (3.201) jesu zbroj reaktancija generatora i mreže do mjesta kratkog spoja, pa za (3.201) možemo napisati

$$\sigma = \frac{X_{dg} + X_{dm}}{X_{dg}'' + X_{dm}} \qquad \dots (3.206a)$$

$$\sigma' = \frac{X_{dg}' + X_{dm}}{X_{dg}'' + X_{dm}} \qquad \dots (3.206b)$$

Uvođenjem omjera

$$\sigma_g = \frac{X_{dg}}{X_{dg}''} \qquad \dots (3.207a)$$

$$\sigma_g' = \frac{X_{dg}'}{X_{dg}''} \qquad \dots (3.207b)$$

$$\sigma_m = \frac{X_{dm}}{X_{dg}''} \qquad \dots (3.207c)$$

te nakon dijeljenja brojnika i nazivnika relacije (3.206) sa X_{dg}'' dobivamo

$$\sigma = \frac{\sigma_g + \sigma_m}{1 + \sigma_m} \qquad \dots (3.208a)$$

$$\sigma' = \frac{\sigma_g' + \sigma_m}{1 + \sigma_m} \qquad \dots (3.208b)$$

Ako iz (3.208a) odredimo σ_m, pa tu vrijednost uvrstimo u (3.208b), dobit ćemo

$$\sigma' = \frac{\sigma(\sigma_g' - 1) + \sigma_g - \sigma_g'}{\sigma_g - 1} \qquad \dots (3.209)$$

Prema tome za određene karakteristike generatorâ, jer σ_g i σ_g' ovise samo o karakteristikama generatorâ, omjer σ' ovisi o omjeru σ. Relaciju za σ (3.209) treba uzeti u obzir prilikom određivanja efektivne vrijednosti struje kratkog spoja, jer se σ' ne može odabrati neovisno o σ.

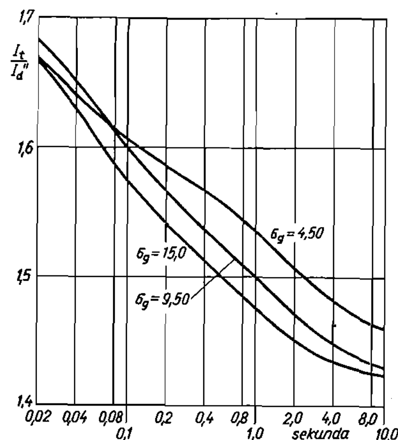
Integriranjem izraza (3.205), a nakon korjenovanja, dolazi se do omjera struje mjerodavne za ugrijavanje i efektivne vrijednosti izmjenične komponente struje kratkog spoja. Integriranje treba provesti između vrijednosti 0 i vremena $t = 0{,}20\, n$, gdje je n bilo koji prirodni broj, dakle uz pretpostavku da kratki spoj traje n perioda. Pri tome treba imati u vidu činjenicu da izračunate vrijednosti za I_t vrijede točno samo kad se integracija provede do cijele periode.

U izrazu (3.205) prvi, drugi, treći, peti, šesti i osmi ovise samo o izmjeničnoj komponenti struje kratkog spoja, četvrti član ovisi samo o istosmjernoj komponenti, a sedmi, deveti i deseti član ovisi i o izmjeničnoj i o istosmjernoj komponenti struje kratkog spoja.

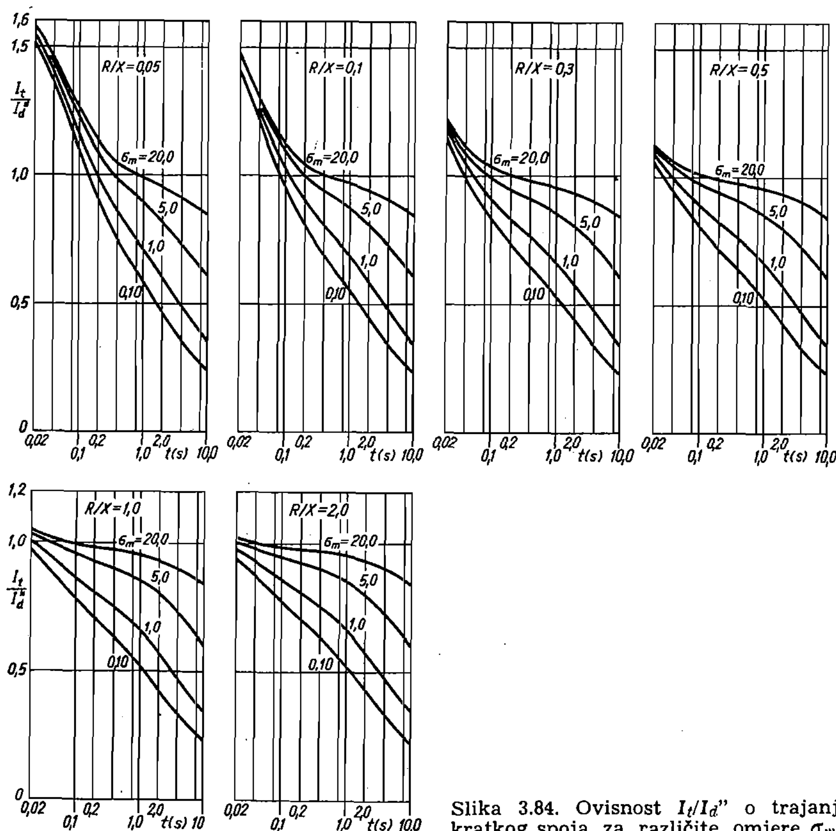
Ako usporedimo prilike za slučaj kratkog spoja na stezaljkama turbogeneratora s vrlo visokim omjerom $\sigma_g = 15{,}0$ i za slučaj kratkog spoja na stezaljkama generatora s izrazitim polovima s vrlo malim omjerom $\sigma_g = 4{,}50$, vidjet ćemo (sl. 3.83) da se ovisnost I_t/I_d'' o trajanju kratkog spoja međusobno znatno ne razlikuju. Ovdje treba naglasiti da skoro ni ne postoji razlika među omjerima σ'_g za različite tipove generatora. Zbog svega toga povoljno je za razmatranje prilika u nekoj mreži odabrati takve karakteristike generatora koje odgovaraju strukturi generatora u promatranoj mreži, pa proračun struje mjerodavne za ugrijavanje provesti na osnovu tako odabranih karakteristika generatora. Za mrežu u kojoj je udio hidroenergije praktički jednak udjelu termoenergije može se računati sa $\sigma_g = 9{,}50$. U tom slučaju ovisnost I_t/I_d'' nalazi se između ovisnosti I_t/I_d'' za $\sigma_g = 15{,}0$ i $\sigma_g = 4{,}50$ (sl. 3.83) i to u području vremena koja su za praktični proračun interesantni.

Uz pretpostavku da je $\sigma_g = 9{,}50$ na sl. 3.84 prikazane su ovisnosti omjera I_t/I_d'' za niz vrijednosti σ_m i R/X o trajanju kratkog spoja. Iz dijagrama na sl. 3.84 moguće je odrediti omjer I_t/I_d'' interpolacijom za bilo koji σ_m i R/X.

U relaciji (3.205) četvrti, sedmi, deveti i deseti član ovise o omjeru R/X, jer se u njima pojavljuje veličina γ (3.202c), koja ovisi o tom omjeru. Istina je da i ostali članovi ovise o omjeru R/X, jer se u njima pojavljuje



Slika 3.83. Ovisnost I_t/I_d'' o trajanju kratkog spoja za $R/X = 0$ i $\sigma_m = 0$



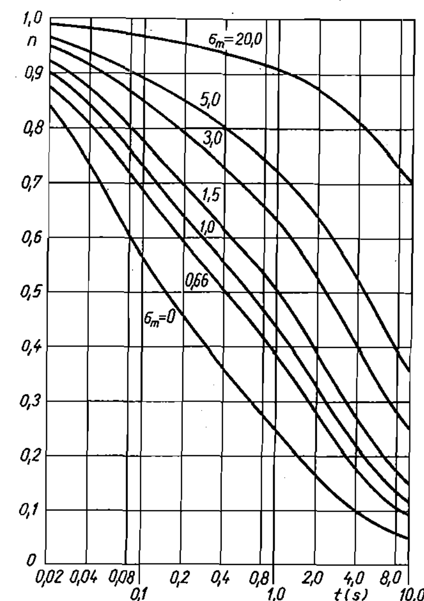
Slika 3.84. Ovisnost I_t/I_d'' o trajanju kratkog spoja za različite omjere σ_m i R/X

fazni pomak φ, koji je ovisan o R/X (3.137), ali je utjecaj faznog pomaka malen, pa ga se može zanemariti. Zbog toga možemo relaciju (3.205) podijeliti u dva dijela: prvi koji obuhvaća prvi, drugi, treći, peti, šesti i osmi član i drugi, koji je prikazan četvrtim, sedmim, devetim i desetim članom. Prvi dio (n) — za određeni σ_g i σ_g' — ovisi samo o σ_m (sl. 3.85) uz zanemarenje utjecaja faznog pomaka φ, dok drugi dio (m) praktički ovisi samo o R/X, (sl. 3.86) jer članovi (sedmi, deveti i deseti) u kojima se pojavljuje σ_m (u σ i σ' imaju vrlo male vrijednosti, pa se utjecaj σ_m može zanemariti.

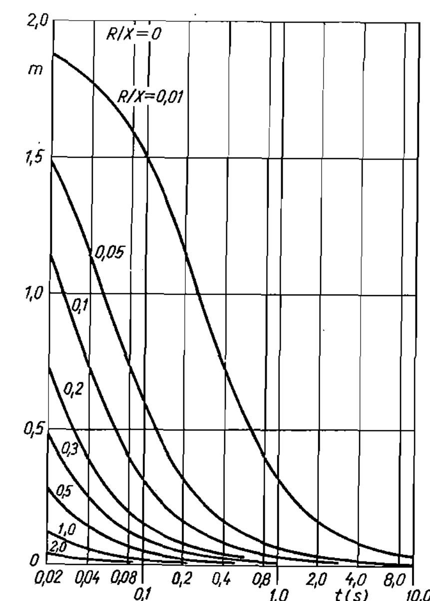
Poznavajući vrijednosti n i m iz dijagrama na sl. 3.85 i 3.86, efektivna struja kratkog spoja određuje se iz relacije

$$I_t = I_d'' \sqrt{n + m} \qquad \ldots (3.210)$$

u kojoj se I_d'' određuje iz (3.199).



Slika 3.85. Vrijednost n prvog, drugog, trećeg, petog, šestog i osmog člana relacije (3.205)



Slika 3.86. Vrijednost m četvrtog, sedmog, devetog i desetog člana relacije (3.205)

Pri određivanju efektivne struje kratkog spoja potrebno je — u ovom slučaju — poznavati dakle veličinu izmjenične komponente struje kratkog spoja, neposredno nakon nastanka kratkog spoja. Pomoću istih veličina (m i n) možemo odrediti efektivnu vrijednost struje kratkog spoja, odnosno struje mjerodavne za ugrijavanje, ako pođemo od trajne struje kratkog spoja, koja je definirana izrazom

$$I_d = \frac{V_m}{\sqrt{2}\, X_d} \qquad \ldots (3.211)$$

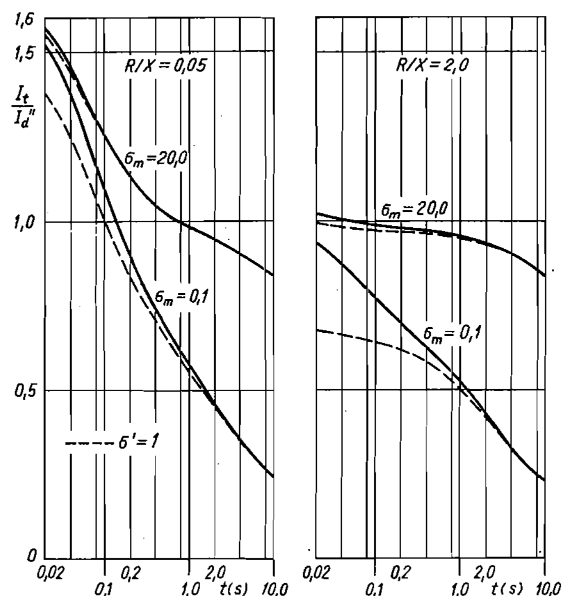
U tom slučaju imamo

$$I_t = I_d \sqrt{\sigma^2 m + \sigma^2 n} \qquad \ldots (3.212)$$

jer je

$$\sigma = \frac{I_d''}{I_d} \qquad \ldots (3.213)$$

U tu svrhu bi trebalo odrediti krivulje $m' = \sigma^2 m$ i $n' = \sigma^2 n$, koje bi se moglo izračunati iz podataka sa sl. 3.85. i 3.86.

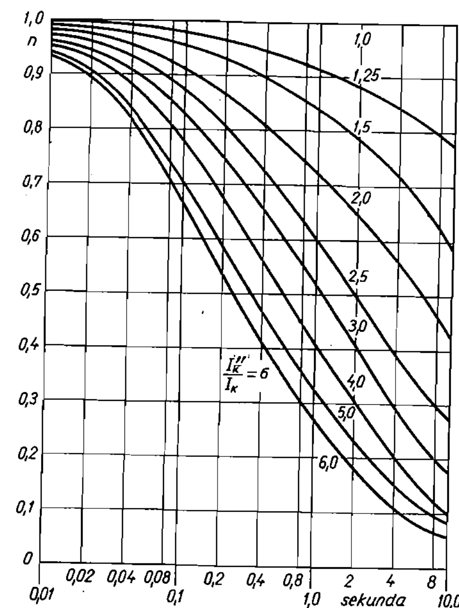


Slika 3.87. Utjecaj zanemarenja razlike između početne i prelazne reaktancije na omjer I_t/I_d''

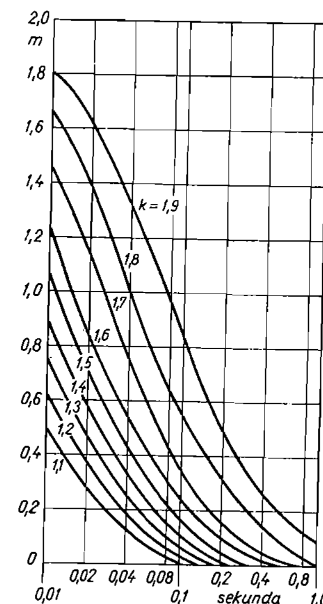
U nekim slučajevima (Lit. 23) polazi se od pretpostavke da je $\sigma_g' = 1$, odnosno da su početne i prelazne reaktancije generatora međusobno jednake. Uz takvu pretpostavku zanemaruje se utjecaj početne reaktancije. Postavljanjem $\sigma_g' = 1{,}00$ postaje (3.209) i $\sigma' = 1{,}00$, pa prvi, peti, šesti, i sedmi član (3.205) postaju jednaki nuli. Da se prikaže utjecaj takve pretpostavke na sl. 3.87 prikazana je ovisnost I_t/I_d'' koja vrijedi kad se uzmu u obzir razlike između početne i prelazne reaktancije (puna crta) i kad se pretpostavi da je $\sigma_g'=1$ (crtkano). Pokazuje se da je razlika tim veća što je mjesto kratkog spoja bliže generatoru (manja vrijednost σ_m) i što je veći omjer R/X.

B. Propisi za određivanje struje mjerodavne za ugrijavanje

Njemački propisi (Lit. 24) navode način na koji se određuju veličine n i m iz relacija (3.210). Da se skrati računski postupak, veličine n i m čitaju se iz dijagrama prikazanih na sl. 3.88. i 3.89. Dijagram za n nacrtan je bez obzira na veličine σ_g i σ_g' i predstavlja vrijednosti s kojima se može računati u sistemu koji ima karakteristike generatora slične onima u Njemačkoj, dakle u elektroenergetskom sistemu u kojem su u velikoj većini turbogeneratori. Dijagram za m nacrtan je s veličinom k (sl. 3.59) kao parametrom.



Slika 3.88. Veličina n u ovisnosti o trajanju kratkog spoja i omjera (3.206a) prema njemačkim propisima VDE 0103 1.61.



Slika 3.89. Veličina m u ovisnosti o trajanju kratkog spoja i veličini k (sl. 3.59) prema njemačkim propisima VDE 0103 1.61.

ČETVRTO POGLAVLJE

GLAVNI ELEMENTI RASKLOPNIH POSTROJENJA

4.1. SABIRNICE I NJIHOVA OPREMA

A. Općenito

Sabirnice su električka okosnica rasklopnog postrojenja. One povezuju vodove kojima se dovodi energija s vodovima koji je dalje odvode. Svi su vodovi dakle spojeni sa sabirnicama, pa su one za normalan pogon rasklopnog postrojenja od najveće važnosti.

Sabirnice se izvode od neizoliranih bakrenih ili aluminijskih vodiča. Za rasklopna postrojenja unutarnje izvedbe do nazivnog napona 35 kV dolaze u obzir okrugli, plosnati ili U-profili, dok se za takva postrojenja višeg napona, bilo unutarnje bilo vanjske izvedbe, upotrebljavaju užeta ili cijevi.

Izbor presjeka sabirnica vrši se

a) s obzirom na maksimalnu struju u normalnom pogonu,

b) s obzirom na povišenje temperature sabirnica za vrijeme trajanja kratkog spoja i

c) s obzirom na mehaničko naprezanje u slučaju kratkog spoja.

B. Izbor presjeka sabirnica s obzirom na maksimalnu struju u normalnom pogonu

Pod maksimalnom strujom u normalnom pogonu, mjerodavnom za izbor presjeka sabirnica, razumijevamo najveću struju koja u normalnom pogonu teče kroz najviše opterećeni dio sabirnica. Prema najviše opterećenom dijelu dimenzioniraju se cijele sabirnice.

Ugrijavanje iznad temperature okoline mjerilo je za određivanje dopuštenog opterećenja sabirnica, uz pretpostavku da maksimalna struja traje neograničeno dugo vremena. Dopušteno je povišenje temperature sabirnica za 30° C iznad temperature okoline. Dopuštena opterećenja određena su eksperimentalno. U tab. 4.1. i 4.2 navedena su dopuštena trajna opterećenja za bakrene i aluminijske plosnate profile, u tab. 4.3. i 4.4. za okrugle, a u tab. 4.5. za U-profile.

TABLICA 4.1.

Dopuštena trajna opterećenja u A bakrenih plosnatih profila
(povišenje temperature za 30° C) (Lit. 25)

Visina × širina mm	Obojeni vodiči, broj vodiča po fazi: I	II	III	–|50|– II II	Neobojeni vodiči, broj vodiča po fazi: I	II	III	–|50|– II II
12 × 2	125	225			110	200		
15 × 2	155	270			140	240		
20 × 2	205	350			185	315		
25 × 3	300	510			270	460		
30 × 5	450	780			400	700		
40 × 5	600	1000			520	900		
40 × 10*	835	1500	2060	2800	750	1350	1850	2500
50 × 5*	700	1200	1750	2300	630	1100	1550	2100
50 × 10*	1025	1800	2450	3300	920	1620	2200	3000
60 × 5*	825	1400	1930	2650	750	1300	1800	2400
60 × 10*	1200	2100	2800	3800	1100	1860	2500	3400
80 × 5	1060	1800	2450	3300	950	1650	2200	2900
80 × 10*	1540	2600	3450	4600	1400	2300	3100	4200
100 × 10*	1880	3100	4000	5400	1700	2700	3600	4800
120 × 10*	2200	3500	4600	6100	2000	3200	4200	5500

* Preporučuje se za sabirnice, ostali profili za spoj sabirnica i aparata

TABLICA 4.2.

Dopuštena trajna opterećenja u A aluminijskih plosnatih profila
(povišenje temperature za 30° C) (Lit. 25)

Visina × širina mm	Obojeni vodiči, broj vodiča po fazi: I	II	III	–|50|– II II	Neobojeni vodiči, broj vodiča po fazi: I	II	III	–|50|– II II
12 × 2	100	180			80	140		
20 × 2	195	340			145	270		
25 × 3	240	410			180	330		
30 × 3	280	480			205	385		
30 × 5*	360	625			270	500		
40 × 5*	460	800			350	650		
40 × 10*	670	1200	1650	2250	515	975	1350	1800
50 × 5*	560	970	1400	1850	425	780	1120	1500
50 × 10*	820	1440	1960	2660	625	1150	1600	2160
80 × 10*	1230	2100	2760	3680	930	1650	2300	3100
100 × 10*	1500	2450	3200	4300	1100	1950	2700	3700
120 × 10*	1760	2800	3700	4900	1310	2350	3100	4300

* Preporučuje se za sabirnice, ostali profili za spoj sabirnica i aparata

Ugrijavanje plosnatih profila određeno je uz pretpostavku da je dulja stranica presjeka okomita na površinu poda, te da je razmak pojedinih vodiča jednak širini vodiča. Osim toga navedena dopuštena trajna opterećenja vrijede za horizontalan raspored sabirnica (sl. 4.1a), dok za vertikalan raspored (sl. 4.1b) treba smanjiti dopuštena trajna opterećenja za 10 do 15% (korekcioni faktor 0,85 . . . 0,90), radi smanjenog hlađenja više postavljenih sabirnica.

Položeni položaj vodiča (tab. 4.6) dovodi do slabijeg odvođenja topline, pa su i dopuštena trajna opterećenja manja. Dopuštena opterećenja određuju se tada tako da se podaci iz tab. 4.1. i 4.2. pomnože s korekcionim

TABLICA 4.3.

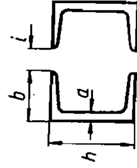
Dopuštena trajna opterećenja u A okruglih profila
(povišenje temperature za 30° C) (Lit. 25)

Promjer mm	Bakar: obojeni vodič	Bakar: neobojeni vodič	Aluminij: obojeni vodič	Aluminij: neobojeni vodič
6	125	120	65	60
8	160	150	—	—
10	250	210	200	160
16	480	410	380	316
20	640	540	500	410
30	1100	900	870	680

TABLICA 4.4.

Dopuštena trajna opterećenja u A bakrenih i aluminijskih cijevi
(povišenje temperature za 30° C) (Lit. 25)

Vanjski promjer mm	Unutarnji promjer mm	Bakar: obojeni vodič	Bakar: neobojeni vodič	Aluminij: obojeni vodič	Aluminij: neobojeni vodič
20	16	360	325	280	230
	14	430	400	350	285
	12	480	430	385	320
30	26	550	500	430	350
	24	650	600	520	420
	22	800	650	580	470
50	44	1100	950	850	670
	42	1200	1100	970	770
	40	1400	1200	1000	820
60	54	1250	1200	1000	800
	52	1500	1300	1150	920
	50	1600	1450	1275	1000

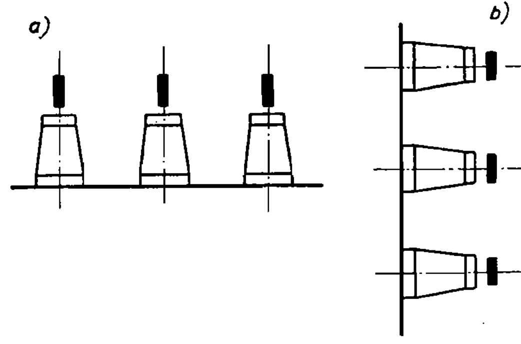


TABLICA 4.5.

Dopuštena trajna opterećenja u A bakrenih i aluminijskih U-profila
(povišenje temperature za 30° C) (Lit. 25)

Ozna-ka	h mm	b mm	a mm	i mm	Bakar				Aluminij			
					obojeni vodič		neobojeni vodič		obojeni vodič		neobojeni vodič	
					[	[ ]	[	[ ]	[	[ ]	[	[ ]
5	50	25	4	25					750	1700	585	1330
6	60	30	4	25	1100	2250	990	2100	880	1800	685	1370
7	70	32,5	5	25					1140	2100	890	1620
8	80	37,5	6	25	1800	3200	1650	2900	1460	2540	1135	2000
10	100	37,5	8	25	2500	4300	2300	3900	2000	3450	1550	2700
12	120	45	10	30	3400	5900	3100	5300	2720	4700	2100	3750
14	140	52,5	11	35	4200	7300	3800	6500	3350	5800	2600	4600
16	160	60	12	40	5000	8800	4500	7900	4000	7000	3100	5400
18	180	67,5	13	45	6000	10300	5400	9200	4750	8200	3600	6400
20	200	75	14	50	6900	11900	6200	10700	5500	9500	4300	7400

faktorima iz tab. 4.6. Radi toga se u najviše slučajeva plosnati vodiči postavljaju okomito.



Slika 4.1. Horizontalni (a) i vertikalni (b) raspored sabirnica

TABLICA 4.6.

Korekcioni faktori za određivanje dopuštenog trajnog opterećenja položenih vodiča (Lit. 25)

vodiča	Visina vodiča mm	Širina vodiča i njihov razmak mm	Korekcioni faktor	
			obojeni vodič	neobojeni vodič
‖ ‖‖	50—200	5—10	0,90 0,85	0,85 0,80
‖‖ ‖‖‖	50— 80 100—120 160 200	5—10	0,85 0,80 0,75 0,70	0,80 0,75 0,70 0,65

Ako je dopušteno manje ili veće povišenje temperature od 30° C, za koje vrijede tab. 4.1 ... 4.5, dopušteno trajno opterećenje vodiča određuje se iz relacije

$$I = I_{30} \sqrt{\frac{\Delta \vartheta}{30}} \qquad \dots (4.1)$$

gdje je I_{30} dopušteno opterećenje vodiča uz povišenje temperature od 30°, a $\Delta \vartheta$ dopušteno povišenje temperature u °C. Izraz (4.1) osniva se na činjenici da je toplina koja se razvija u vodiču proporcionalna kvadratu struje. Iz relacije (4.1) određujemo i povišenje temperature, do čega će doći ako kroz vodič trajno protječe struja I

$$\Delta \vartheta = 30 \left(\frac{I}{I_{30}}\right)^2 \qquad \dots (4.2)$$

Bojenjem sabirnica povećava se odvođenje topline, pa su radi toga posebno navedena dopuštena opterećenja za obojene, a posebno za neobojene vodiče.

Zbog čvrstoće u postrojenjima do 35 kV ne izvode se sabirnice profila manjeg od 40 × 5 mm, dok je za napone 110 kV i više minimalni presjek, odnosno promjer, određen zahtjevom sprečavanja pojave korone. Tako je za rasklopno postrojenje nazivnog napona 110 kV najmanji presjek užeta 95 mm², a najmanji promjer cijevi 30 mm, dok je za napon 220 kV najmanji presjek užeta 300 mm², a najmanji promjer cijevi 50 mm.

Profil, odnosno presjek vodiča za sabirnicu, određen prema maksimalnoj struji u normalnom pogonu, polazna je tačka pri dimenzioniranju sabirnice. Tako odabrani profil treba međutim kontrolirati s obzirom na ugrijavanje i s obzirom na mehaničko naprezanje u slučaju kratkog spoja.

C. Kontrola presjeka sabirnica s obzirom na ugrijavanje za vrijeme kratkog spoja

Usprkos kratkom vremenu kroz koje teče struja kratkog spoja, ugrijavanja vodiča može u nepovoljnom slučaju izazvati oštećenje sabirnica. Povišenje temperature nastaje brzo i može se računati da se za vrijeme trajanja kratkog spoja toplina ne odvodi u okolinu, pa je ugrijavanje proporcionalno toplini koja se stvara u vodiču. Uz navedenu pretpostavku možemo postaviti jednadžbu

$$G\,c\,\Delta\vartheta = I_t^2\, r\, t \qquad \ldots (4.3)$$

gdje su: G masa vodiča (kg), c specifična toplina vodiča (Ws/kg, °C), $\Delta\vartheta$ povišenje temperatura (°C) za vrijeme trajanja kratkog spoja, I_t efektivna vrijednost struje kratkog spoja (A) za vrijeme t (s) trajanja kratkog spoja, a r djelatni otpor (Ω) vodiča. Lijeva i desna strana izraza (4.3) predstavljaju toplinu razvijenu u vodiču za vrijeme trajanja kratkog spoja. Ako otpor r izrazimo pomoću duljine l (m), presjeka q (m²) i specifičnog otpora ϱ (Ω m²/m), dolazimo do izraza za povišenje temperature

$$\Delta\vartheta = I_t^2\, t\, \frac{\varrho\, l}{G\, c\, q} \qquad \ldots (4.4)$$

Ako, dalje, za masu vodiča postavimo $G = \gamma\, q\, l$, gdje je γ gustoća vodiča (kg/m³), dobit ćemo

$$\Delta\vartheta = \frac{I_t^2}{q^2}\, t\, \frac{\varrho}{\gamma\, c} \qquad \ldots (4.5)$$

Prilikom određivanja specifičnog otpora ϱ treba uzeti u obzir utjecaj promjene temperature, prema relaciji

$$\varrho_1 = \varrho_0\,[1 + \alpha\,(\vartheta_1 - \vartheta_0)] \qquad \ldots (4.6)$$

gdje su: α temperaturni koeficijent, ϱ_0 specifični otpor na temperaturi ϑ_0, a ϑ_1 temperatura u trenutku nastanka kratkog spoja. U (4.5) treba uvrstiti srednji specifični otpor između temperature vodiča u trenutku prekida struje kratkog spoja (ϑ_2 °C) i temperature vodiča u trenutku nastanka kratkog spoja (ϑ_1 °C). Taj srednji specifični otpor možemo odrediti iz relacije

$$\varrho = \varrho_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} - \vartheta_0 \right) \right] \qquad \ldots (4.7)$$

do koje dolazimo ako uzmemo da je

$$\varrho = \frac{\varrho_1 + \varrho_2}{2} \qquad \ldots (4.8)$$

Pri određivanju potrebnog presjeka poslužimo se relacijom (4.5), pa ćemo dobiti

$$q = I_t \sqrt{t} \sqrt{\frac{\varrho}{\gamma\, c\, \Delta\vartheta}}\ \text{m}^2 \qquad \ldots (4.9)$$

Za bakrene sabirnice dopuštena je normalno najviša temperatura $\vartheta_2 = 200$ °C, a za aluminijske $\vartheta_2 = 180$ °C. U oba slučaja treba računati s temperaturom $\vartheta_1 = 65$ °C u trenutku nastanka kratkog spoja (35 °C temperatura okoline u najnepovoljnijem slučaju, a 30 °C povišenje temperature u normalnom pogonu). Prema tome povišenje temperature za vrijeme trajanja kratkog spoja iznosi

za bakar $\Delta\vartheta = 135$ °C
za aluminij $\Delta\vartheta = 115$ °C

Specifični otpor za materijal koji se upotrebljava za sabirnice pri 20 °C

za bakar $\varrho_0 = 0{,}0178 \cdot 10^{-6}$ Ω m²/m
za aluminij $\varrho_0 = 0{,}0286 \cdot 10^{-6}$ Ω m²/m

pa je za navedene temperature, a prema (4.7) uz temperaturni koeficijent $\alpha = 0{,}004$, specifični otpor

bakra $\varrho = 0{,}0258 \cdot 10^{-6}$ Ω m²/m
aluminija $\varrho = 0{,}0403 \cdot 10^{-6}$ Ω m²/m

Srednja specifična toplina iznosi

za bakar $c = 387{,}3$ Ws/kg, °C
za aluminij $c = 908{,}5$ Ws/kg, °C

dok je gustoća

bakra $\gamma = 8{,}9 \cdot 10^3$ kg/m³
aluminija $\gamma = 2{,}7 \cdot 10^3$ kg/m³

Uzevši sve to u obzir, izraz (4.9) za bakrenu sabirnicu glasi

$$q_{cu} = 7{,}5\, I_t \sqrt{t}\, 10^{-9}\ \text{m}^2 \qquad \ldots (4.10\text{a})$$

a za aluminijsku sabirnicu

$$q_{al} = 12{,}0\, I_t \sqrt{t}\, 10^{-9}\ \text{m}^2 \qquad \ldots (4.11\text{a})$$

Za praksu je povoljno ako struju izrazimo u kA, a presjek u mm², pa je

$$q_{cu} = 7{,}5\, I_t \sqrt{t}\ \text{mm}^2 \qquad \dots (4.10b)$$

$$q_{al} = 12{,}0\, I_t \sqrt{t}\ \text{mm}^2 \qquad \dots (4.11b)$$

Naravno da izrazi (4.10) i (4.11) vrijede samo za navedene granice temperatura.

Presjek određen prema (4.9) jest presjek potreban da se spriječi povišenje temperature vodiča iznad dopuštene granice za vrijeme trajanja kratkog spoja, a može da bude i veći i manji od presjeka potrebnog radi ugrijavanja u normalnom pogonu. Svakako da će kao mjerodavan biti odabran veći od ta dva izračunata presjeka.

D. Kontrola presjeka sabirnica s obzirom na mehanička naprezanja

a) O silama među paralelnim vodičima

Magnetsko polje oko okrugle žice možemo odrediti iz izraza (Lit. 26)

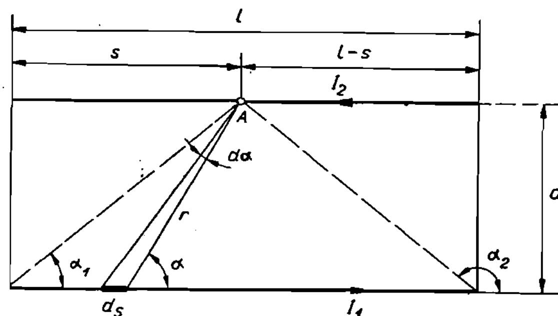
$$\mathbf{dH} = \frac{I}{4\pi}\,\frac{\mathrm{d}\mathbf{s} \times \mathbf{r}}{r^3} \qquad \dots (4.12)$$

gdje su: I struja koja protječe kroz vodič, ds element vodiča, a $\mathbf{r}$ udaljenost između tog elementa i tačke u kojoj želimo odrediti jakost magnetskog polja. Ako kut između ds i $\mathbf{r}$ označimo sa α (sl. 4.2), izraz (4.12) možemo napisati u obliku

$$\mathrm{d}H = \frac{I}{4\pi}\,\frac{\mathrm{d}s \sin\alpha}{r^2} \qquad \dots (4.13)$$

Za ds možemo napisati

$$\mathrm{d}s = \frac{r\,\mathrm{d}\alpha}{\sin\alpha} \qquad \dots (4.14)$$



Slika 4.2. Prikaz za određivanje sila među paralelnim vodičima

uzimajući u obzir kut između ds i r, a za udaljenost između ds i tačke A

$$r = \frac{a}{\sin\alpha} \qquad \dots (4.15)$$

gdje je a udaljenost između A i vodiča čiji je element ds. Uvrštavanjem dobivamo

$$\mathrm{d}H = \frac{I}{4\pi}\,\frac{\sin\alpha\,\mathrm{d}\alpha}{a} \qquad \dots (4.16)$$

Integriranjem u granicama α_1 do α_2 (sl. 4.2) dolazimo do jakosti magnetskog polja u tački A, što je posljedica struje u paralelnom vodiču duljine l. Vrijednost integrala jest

$$H\,(A) = \frac{I}{4\pi a}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin\alpha\,\mathrm{d}\alpha = \frac{I}{4\pi a}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \qquad \dots (4.17)$$

Ako položaj tačke A definiramo udaljenošću s od kraja paralelnog vodiča, (4.17) možemo napisati u obliku

$$H\,(s) = \frac{I}{4\pi a}\left[\frac{s}{\sqrt{s^2 + a^2}} + \frac{l - s}{\sqrt{(l - s)^2 + a^2}}\right] \qquad \dots (4.18)$$

dok za beskonačno dug vodič u bilo kojoj tački na paralelnom vodiču jakost magnetskog polja iznosi

$$H = \frac{I}{2\pi a} \qquad \dots (4.19)$$

jer je tada $\alpha_1 = 0$, a $\alpha_2 = \pi$.

Sila na jedinicu duljine elementa vodiča ds_2 kroz koji protječe struja I_2, a koji se nalazi u magnetskom polju struje I_1, može se odrediti iz jednadžbe

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}s_2} = I_2 B_1 \qquad \dots (4.20)$$

gdje je B_1 magnetska indukcija koja odgovara jakosti magnetskog polja H_1 od struje I_1. Budući da je $B_1 = \mu H_1$, te da je u jedinicama međunarodnog sistema

$$\mu = 4\pi\, 10^{-7}\ \text{H/m} \qquad \dots (4.21)$$

sila na vodič konačne duljine u tački A — uzevši u obzir relaciju (4.18) — jest

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}s_2} = \frac{I_1 I_2}{a}\,10^{-7}\left[\frac{s}{\sqrt{s^2 + a^2}} + \frac{l - s}{\sqrt{(l - s)^2 + a^2}}\right]\ \text{N/m} \qquad \dots (4.22)$$

dok za vodiče beskonačne duljine silu na jedinicu duljine određujemo iz formule — uzimajući sada u obzir relaciju (4.19)

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}s_2} = 2\,\frac{I_1 I_2}{a}\,10^{-7}\ \text{N/m} \qquad \dots (4.23)$$

Sila po jedinici duljine izlazi u njutonima po m, struje treba uvrstiti u amperima, a razmak između vodiča u m. Ako mjesto njutona kao jedinicu za silu želimo upotrijebiti kilopond (kp), moramo izraze (4.22) i (4.23) množiti sa 0,102, jer je 1 N = 0,102 kp. Tada dobivamo

$$\frac{dF}{ds_2}(s) = 1{,}02\,\frac{I_1 I_2}{a}\,10^{-8}\left[\frac{s}{\sqrt{s^2+a^2}} + \frac{l-s}{\sqrt{(l-s)^2+a^2}}\right]\text{kp/m} \qquad \ldots (4.24)$$

i

$$\frac{dF}{ds_2} = 2{,}04\,\frac{I_1 I_2}{a}\,10^{-8}\ \text{kp/m} \qquad \ldots (4.25)$$

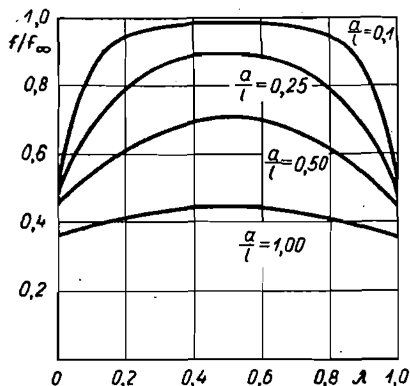
Izvod navedenih izraza polazi od polja proizvedenog strujom I_1 i njegovog djelovanja na vodič kroz koji protječe struja I_2. Do istih izraza došli bismo kad bismo pošli od polja proizvedenog strujom I_2.

Uspoređujući izraze (4.24) i (4.25) dolazimo do zaključka da za konačnu duljinu vodiča dobivamo manju silu. Normalno se — kako ćemo još vidjeti — račun izvodi prema (4.25), pa je interesantno znati kolika pogreška nastaje prilikom takvog računa. Omjer između izraza (4.24) i (4.25) prikazuje omjer stvarne sile i sile određene uz pretpostavku da su vodiči beskonačno dugi. Taj je omjer

$$\frac{f}{f_\infty} = \frac{1}{2}\left[\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2+\left(\frac{a}{l}\right)^2}} + \frac{1-\lambda}{\sqrt{(1-\lambda)^2+\left(\frac{a}{l}\right)^2}}\right] \qquad (4.26)$$

gdje su f sila po jedinici duljine prema (4.24), f_∞ sila prema (4.25), a $\lambda = \frac{s}{l}$. Na sl. 4.3. prikazana je ovisnost omjera f/f_∞ o λ za različite a/l. Maksimalna sila pojavljuje se u sredini, dakle za $\lambda = \frac{1}{2}$, pa za taj slučaj izraz (4.26) glasi

$$\frac{f_{max}}{f_\infty} = \frac{1}{\sqrt{1+4\left(\frac{a}{l}\right)^2}} \qquad \ldots (4.27)$$



Slika 4.3. Ovisnost omjera f/f_∞ (4.26) o veličini $\lambda \left(= \frac{s}{l}\right)$ za različite vrijednosti omjera $\frac{a}{l}$ (razmak među vodičima prema duljini vodiča)

Ovisnost f_{max}/f_∞ o omjeru a/l prikazana je na sl. 4.4.

Sve navedeno odnosi se na silu po jedinici duljine, koja je za vodič konačne duljine ovisna o udaljenosti od kraja vodiča, dok je ta sila za vodiče beskonačne duljine konstantna. Za naprezanje, međutim, važna je ukupna sila koja djeluje na vodič, koju možemo definirati izrazom

$$F = \int \frac{dF}{ds_2}\,ds_2 \qquad \ldots (4.28)$$

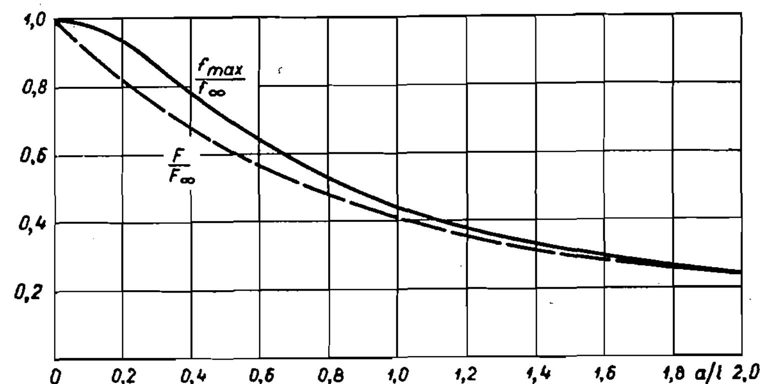
Integriranjem (4.22) dobivamo

$$F = 2\,\frac{I_1 I_2}{a}\,10^{-7}\left(\sqrt{l^2+a^2} - a\right)\ \text{N} \qquad \ldots (4.29)$$

i to je ukupna sila na vodič duljine l, dok je ukupna sila na vodič iste duljine, ako pretpostavimo da raspodjela silâ odgovara vodiču beskonačne duljine

$$F_\infty = 2\,\frac{I_1 I_2}{a}\,l\,10^{-7}\ \text{N} \qquad \ldots (4.30)$$

Izraz (4.30) dobiven je integriranjem (4.28) relacije (4.23). I sada možemo načiniti omjer F/F_∞, koji pokazuje kako se odnosi ukupna sila, uzmemo



Slika 4.4. Ovisnost omjera f_{max}/f_∞ (4.27) i F/F_∞ (4.31) o omjeru udaljenosti među vodičima (a) i duljine vodiča (l)

li u obzir konačne duljine vodiča, prema sili koja se dobiva ako pretpostavimo da je vodič, u čijem se polju nalazi promatrani vodič, beskonačno dug. Za taj omjer možemo postaviti

$$\frac{F}{F_\infty} = \sqrt{1+\frac{a^2}{l^2}} - \frac{a}{l} \qquad \ldots (4.31)$$

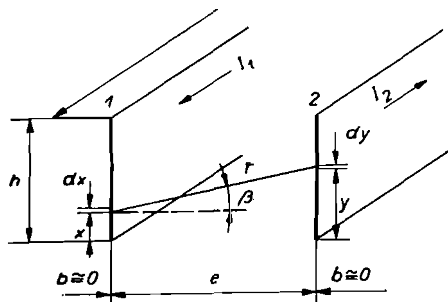
Ovisnost (4.31) prikazana je na sl. 4.4.

Pri malim omjerima a/l, koji se normalno javljaju u rasklopnim postrojenjima (već u najmanjim takvim postrojenjima omjer a/l jest oko

0,3, dok je u nešto većim manji od 0,1), opravdano je računati kao da se radi o beskonačno dugim vodičima, (tj. kao da je omjer $F/F_\infty = 1$). Uz takvu pretpostavku računa se s nešto većom silom nego što se stvarno pojavljuje (sl. 4.3. i 4.4).

Izvedene formule vrijede za okrugle vodiče, pa je svakako od interesa poznavati sile u slučaju upotrebe plosnatih sabirnica. Pođimo od paralelnih sabirnica zanemarivo male širine ($b \cong 0$), prikazanih na sl. 4.5. Ako pretpostavimo jednoliku raspodjelu struje u vodiču, kroz element dx sabirnice (1) protječe struja

$$dI_1 = I_1 \frac{dx}{h} \qquad \ldots (4.31a)$$



Slika 4.5. Određivanje sile među paralelnim plosnatim vodičima zanemarivo male širine ($b \cong 0$)

Jakost magnetskog polja u tački sabirnice (2), koja je udaljena r od sabirnice (1), određena je relacijom analognom izrazu (4.19), jer se radi o polju beskonačno dugog vodiča. Uzmemo li u obzir sl. 4.5. i relaciju (4.31a) za jakost polja, možemo napisati

$$dH_1 = \frac{I_1}{2\pi} \frac{dx}{h\,r} \qquad \ldots (4.31b)$$

Za silu na element duljine ds_2 i visine dy sabirnice (2) možemo, analogno izrazu (4.20), napisati

$$\left(\frac{dF}{ds_2}\right)'' = dB_1\, dI_2 \qquad \ldots (4.31c)$$

Uzmemo li u obzir da je

$$dI_2 = I_2 \frac{dy}{h} \qquad \ldots (4.31d)$$

i permeabilnost (4.21), dobivamo za silu

$$\left(\frac{dF}{ds_2}\right)'' = 2\, I_1 I_2 \frac{dx\,dy}{h^2\, r}\, 10^{-7}\ \text{N/m} \qquad \ldots (4.32)$$

Izraz (4.32) daje vrijednost sile u smjeru udaljenosti r (sl. 4.5), koju možemo rastaviti u dvije međusobno okomite komponente. Suma komponenata koje padaju u ravninu vodiča, uzevši u obzir sve elemente drugog vodiča, jednaka je nuli, pa je potrebno poznavati samo horizontalnu komponentu (F_h). S obzirom na oznake na sl. 4.5, možemo postaviti

$$F_h = F\cos\beta = F\frac{e}{r} \qquad \ldots (4.33)$$

Osim toga vrijedi da je

$$r^2 = e^2 + (y - x)^2 \qquad \ldots (4.34)$$

Dakle, za (4.32) možemo napisati

$$\left(\frac{dF_h}{ds_2}\right)'' = 2\, I_1 I_2 \frac{e}{h^2} \frac{dx\,dy}{e^2 + (y-x)^2}\, 10^{-7} \qquad \ldots (4.35)$$

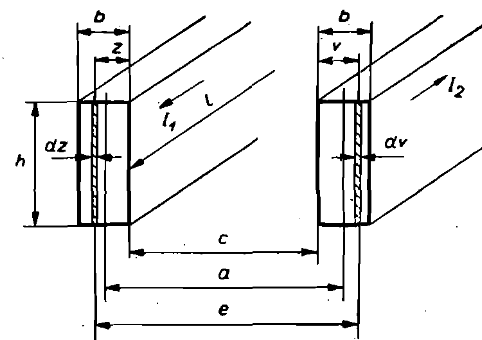
Silu na jedinicu duljine dobivamo integriranjem izraza (4.35) u granicama za x i y od 0 do h

$$\frac{dF_h}{ds_2} = 2\, I_1 I_2 \frac{e}{h^2} 10^{-7} \int_0^h dx \int_0^h \frac{dy}{e^2 + (y-x)^2} \qquad \ldots (4.36)$$

odakle dobivamo

$$\frac{dF_h}{ds_2} = 2\, I_1 I_2 \frac{10^{-7}}{h} \left\{ 2 \operatorname{arc\,tg} \frac{h}{e} - \frac{e}{h} \ln \left[1 + \left(\frac{h}{e}\right)^2 \right] \right\} \qquad \ldots (4.37)$$

Naravno da (4.37) vrijedi za vodiče vrlo male širine ($b \cong 0$), kakvi se ne pojavljuju u praksi, pa je razmatranje potrebno proširiti na vodiče konačne širine (sl. 4.6). Izraz (4.37) predstavlja samo dio sile na vodič, I_1 i I_2 predstavljaju također samo dio struje, pa bi mjesto I_1 i I_2 trebalo



Slika 4.6. Određivanje sile među paralelnim plosnatim vodičima konačne širine b

pisati dI_1 i dI_2, mjesto $e = c + v + z$, a mjesto dF_h/ds_2 treba da bude $(dF_h/ds_2)''$. Uzevši u obzir da je, prema sl. 4.6

$$dI_1 = I_1 \frac{dz}{b} \text{ i } dI_2 = I_2 \frac{dv}{b} \qquad \ldots (4.38)$$

možemo pisati

$$\left(\frac{dF_h}{ds_2}\right)'' = 2\, I_1\, I_2\, \frac{10^{-7}}{b^2 h} \left\{ 2 \operatorname{arc\,tg} \frac{h}{c+v+z} - \right.$$

$$\left. - \frac{c+v+z}{h} \ln \left[1 + \left(\frac{h}{c+v+z}\right)^2 \right] \right\} dv\, dz \qquad \ldots (4.39)$$

Integriranjem u granicama za v i z od 0 do b dolazimo do sile na jedinicu duljine u N/m

$$\frac{dF_h}{ds_2} = 2\, I_1\, I_2\, \frac{10^{-7}}{b^2 h} \int_0^b dv \int_0^b \varphi(v, z)\, dz \qquad \ldots (4.40)$$

gdje je $\varphi(v, z)$ jednak izrazu u vitičastoj zagradi (4.39). Rješenjem dvostrukog integrala dolazimo do sile na jedinicu duljine. Omjer između sile prema (4.40) i sile među okruglim vodičima (4.23) nazovimo korekcionim faktorom k, koji određujemo iz izraza

$$k = \frac{a}{b^2 h} \int_0^b dv \int_0^b \varphi(v, z)\, dz \qquad \ldots (4.41)$$

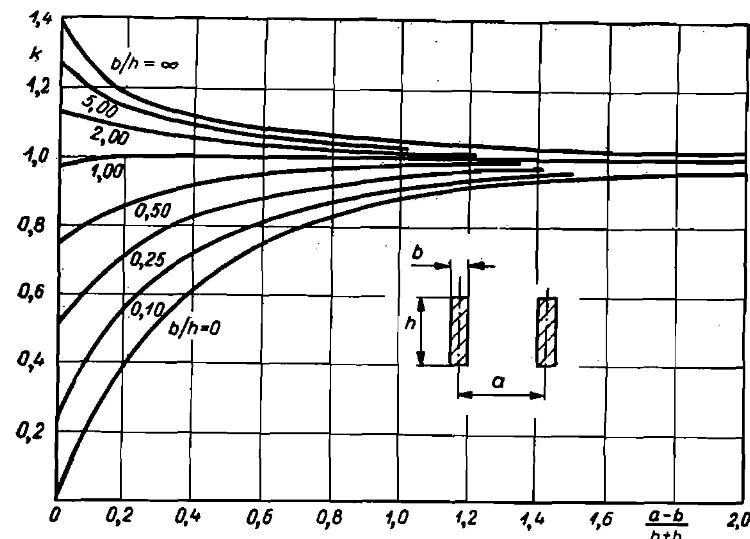
Vrijednosti k možemo prikazati krivuljama (Lit. 29. i 30), koje su ucrtane u dijagramu na sl. 4.7. Omjer k može imati vrijednost koja se znatnije razlikuje od 1 samo ako je

$$\frac{a - b}{h + b} < 2 \qquad \ldots (4.42)$$

a to se može dogoditi kad se radi o niskom naponu (mali a) i o profilu velike visine (h). Za visoke napone prema tome vrlo rijetko će biti potrebno računati sa $k \neq 1$, i samo onda kad se radi o sabirnicama koje se sastoje od jednog vodiča. Ako je, međutim, sabirnica sastavljena od više vodiča, potrebno je uzeti u obzir omjer k, jer se radi o malim razmacima među vodičima, pa se k može i znatno razlikovati od 1. Upotreba dijagrama sa sl. 4.7. bit će prikazana u odsječku o sastavljenim vodičima.

b) O silama među vodičima koji nisu međusobno paralelni

U rasklopnim postrojenjima postoje i spojevi aparata sa sabirnicama, koji nisu paralelni s njima, pa je korisno znati odrediti sile među takvim vodičima. U praksi se, međutim, normalno ne određuju naprezanja u spojnim vodičima, već se njihove dimenzije odabiru u odnosu na dimenzije sabirnica ili prema približnim formulama.



Slika 4.7. Vrijednost omjera k (4.41) u ovisnosti o dimenzijama plosnatih sabirnica i o njihovom razmaku

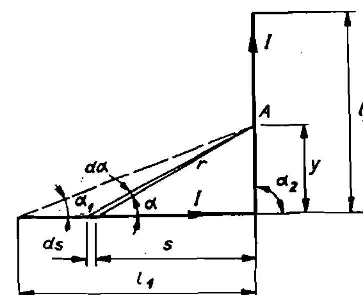
Da se upoznamo s načinom određivanja sila, razmotrimo nekoliko karakterističnih slučajeva.

Pođimo od vodiča savijenog u obliku slova L (slika 4.8). Analognim razmatranjem kao pri određivanju izraza (4.16) dolazimo do relacije za jakost polja u tački A

$$H(A) = \frac{I}{4\pi y} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin\alpha\, d\alpha = \frac{I}{4\pi y} \cos\alpha_1 \qquad \ldots (4.43)$$

jer je $\alpha_2 = \frac{\pi}{2}$. Upotrijebimo li oznake sa sl. 4.8, jakost polja jest

$$H(A) = \frac{I}{4\pi y} \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + y^2}} \qquad \ldots (4.44)$$



Slika 4.8. Određivanje sile na vodič koji s drugim vodičem čini pravi kut

dok je sila na jedinicu duljine — uzimajući u obzir relacije (4.20) i (4.21)

$$f = \frac{dF}{dy} = \frac{I^2}{y} \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + y^2}} 10^{-7} \text{ N/m} \qquad \ldots (4.45)$$

jer kroz oba dijela vodiča protječe ista struja.

Ako pretpostavimo da je $l_1 = \infty$ (sl. 4.8), sila koja djeluje na jedinicu duljine okomito postavljenog vodiča iznosi

$$f_\infty = \frac{dF}{dy} = \frac{I^2}{y} 10^{-7} \text{ N/m} \qquad \ldots (4.46)$$

Ukupna sila koja djeluje na vodič određuje se iz relacije (4.28) s granicama integracije od $\frac{d}{2}$ do l_2, pa kad je l_1 konačna duljina, iznosi

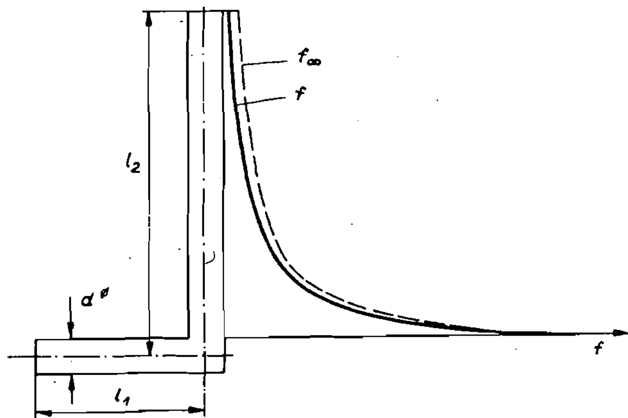
$$F = I^2 \, 10^{-7} \ln \frac{2\,l_2}{d} \frac{l_1 + \sqrt{l_1^2 + \frac{d^2}{4}}}{l_1 + \sqrt{l_1^2 + l_2^2}} \text{ N} \qquad \ldots (4.47)$$

a kad je l_1 beskonačno veliko

$$F_\infty = I^2 \, 10^{-7} \ln \frac{2\,l_2}{d} \text{ N} \qquad \ldots (4.48)$$

gdje je d promjer vodiča.

Na sl. 4.9. prikazana je veličina sile po jedinici duljine za konačnu (4.45) i beskonačnu (4.46) duljinu vodiča, a na sl. 4.10. vrijednosti omjera F/F_∞ u ovisnosti o omjeru duljine vodičâ l_1/l_2, a za različite omjere $2\,l_2/d$

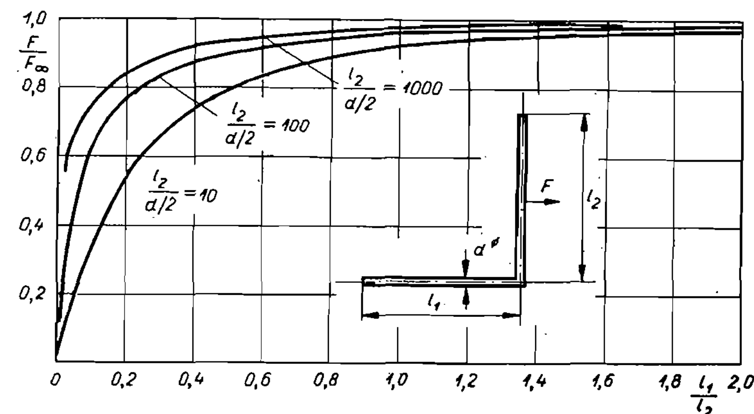


Slika 4.9. Sila po jedinici duljine za slučaj kad je $\frac{l_1}{l_2} = 0{,}5$ i $\frac{l_2}{d/2} = 20$

f prema (4.45), a f_∞ prema (4.46)

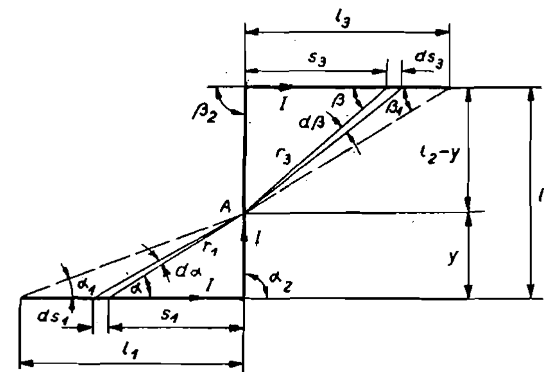
Kad je $l_1/l_2 > 1$ može se bez značajnije pogreške određivanje sile na vodič provesti prema formulama (4.46) i (4.48).

Na srednji dio vodiča savijenog u obliku slova S (sl. 4.11) sile nastaju djelovanjem struja koje protječu kroz oba horizontalna dijela, ali je njihovo djelovanje međusobno suprotno, pa je rezultantna sila diferencija tih dvaju djelovanja. Naravno da je potrebno računati s istom strujom u svim dijelovima vodiča.



Slika 4.10. Vrijednost omjera F/F_∞ — (4.47) prema (4.48) — u ovisnosti o omjeru l_1/l_2 za različite omjere $l_2/\frac{d}{2}$

Analogno slučaju za vodič na sl. 4.8, a uzimajući u obzir da je polje u tački A (sl. 4.11) razlika dvaju polja definiranih izrazima analognim relaciji (4.43) — granice integracije su sada α_1 do α_2 i β_1 do β_2 — možemo napisati da je sila na jedinici duljine



Slika 4.11. Određivanje sile na srednji dio vodiča savijenog u obliku slova S

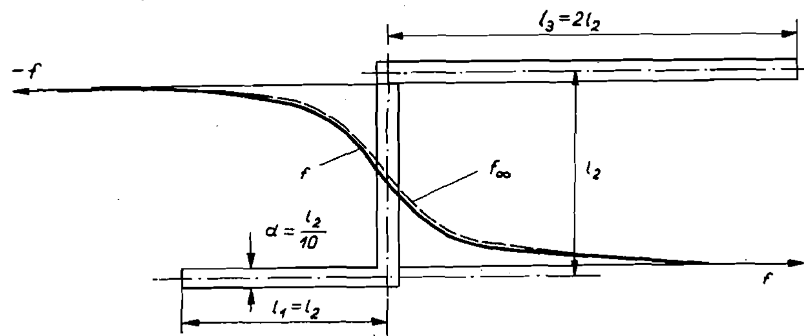
$$f = \frac{dF}{dy} = I^2\, 10^{-7} \left[\frac{l_1}{y\sqrt{l_1^2 + y^2}} - \right.$$

$$\left. - \frac{l_3}{(l_2 - y)\sqrt{l_3^2 + (l_2 - y)^2}} \right] \text{N/m} \qquad \ldots (4.49)$$

Ako sada pretpostavimo da je $l_1 = l_3 = \infty$, dobivamo za silu po jedinici duljine

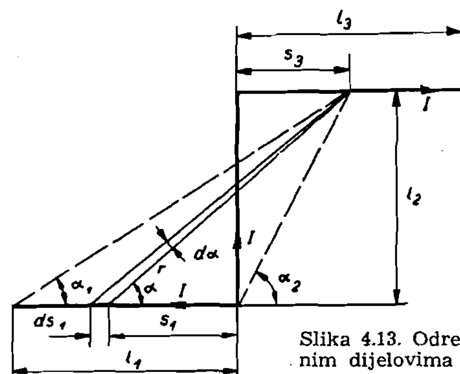
$$f_\infty = I^2\, 10^{-7} \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{l_2 - y} \right) \text{N/m} \qquad \ldots (4.50)$$

Na sl. 4.12. prikazane su sile f (4.49) i f_∞ (4.50), uz pretpostavku da je $l_1 = l_2$ i da je $l_3 = 2\, l_2$.



Slika 4.12. Sile po jedinici duljine f (4.49) i f_∞ (4.50) na srednji dio vodiča savijenog u obliku slova S

Kad je vodič savijen u obliku slova S, pojavljuju se sile i među paralelnim dijelovima (dijelovi duljine l_1 i l_3 na sl. 4.11). U tom slučaju jakost magnetskog polja određujemo prema (4.17), ali uz uvjet da za kosinuse kutova uvrstimo omjere definirane na sl. 4.13. Tada silu po jedinici duljine dobivamo iz relacije



Slika 4.13. Određivanje sile među paralelnim dijelovima vodiča savijenog u obliku slova S

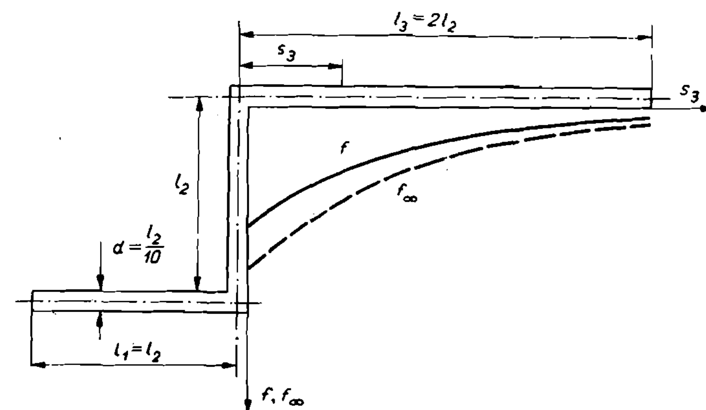
$$f = \frac{dF}{ds_3} = \frac{I^2}{l_2}\, 10^{-7} \left[\frac{l_1 + s_3}{\sqrt{l_2^2 + (l_1 + s_3)^2}} - \right.$$

$$\left. - \frac{s_3}{\sqrt{l_2^2 + s_3^2}} \right] \text{N/m} \qquad \ldots (4.51)$$

Uz pretpostavku da je $l_1 = \infty$, dobivamo

$$f_\infty = \frac{dF}{ds_3} = \frac{I^2}{l^2}\, 10^{-7} \left(1 - \frac{s_3}{\sqrt{l_2^2 + s_3^2}} \right) \text{N/m} \qquad \ldots (4.52)$$

Na sl. 4.14. prikazana je sila po jedinici duljine za konačnu duljinu dijela vodiča l_1 (4.51), kao i sila (4.52), uz pretpostavku da je drugi paralelni dio beskonačno dug.

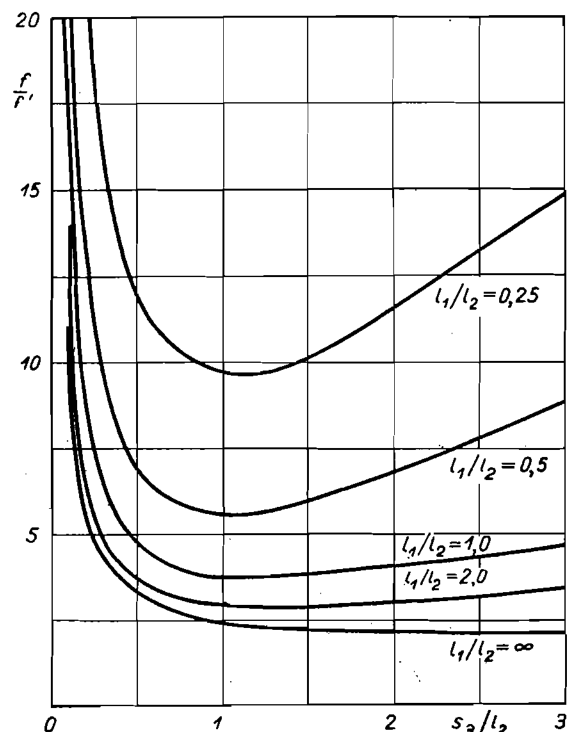


Slika 4.14. Sile po jedinici duljine f (4.51) i f_∞ (4.52) na paralelni dio vodiča radi djelovanja struje u drugom paralelnom dijelu

Na dio vodiča duljine l_3 (sl. 4.13) djeluje, osim sile određene relacijom (4.51), koja je posljedica struje u paralelnom dijelu vodiča, još i sila prouzrokovana strujom u okomitom dijelu vodiča duljine l_2, koju možemo odrediti iz relacije (4.45). Ta relacija — uzevši u obzir oznake na sl. 4.13. — glasi

$$f' = \frac{I^2}{s_3} 10^{-7} \frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 + s_3^2}} \text{ N/m} \qquad \ldots (4.45a)$$

Omjer između f (4.51) i f' (4.45a) pokazuje koliko je puta sila prouzrokovana strujom u okomitom dijelu vodiča veća od sile koja je posljedica struje u paralelnom dijelu vodiča. Taj omjer je prikazan na sl. 4.15. Vidi se da je djelovanje srednjeg dijela vodiča uvijek veće, pa je zanemarenje djelovanja paralelnog dijela vodiča to više opravdano, što je omjer l_1/l_2 manji. Pri tome treba napomenuti da sila prouzrokovana paralelnim vodičem djeluje u suprotnom smislu od sile okomitog vodiča, pa spomenuto zanemarenje — ako do njega dođe — dovodi do veće sigurnosti pri određivanju naprezanja.



Slika 4.15. Omjer između f (4.51) i f' (4.45 a)

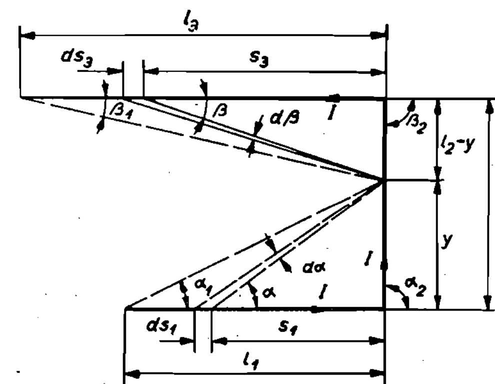
Kad je vodič savijen u obliku slova U (sl. 4.16), na srednji dio vodiča djeluju sile koje su posljedica obaju preostalih dijelova vodiča. Oba dijela vodiča daju sile koje djeluju u istom smjeru. Jakost magnetskog polja dijela vodiča duljine l_1 određena je relacijom (4.43), a jakost polja dijela vodiča duljine l_3 analognom relacijom, pa je sila po jedinici duljine srednjeg dijela vodiča određena izrazom

$$f = \frac{dF}{dy} = I^2\, 10^{-7} \left[\frac{l_1}{y\sqrt{l_1^2 + y^2}} + \frac{l_3}{(l_2 - y)\sqrt{l_3^2 + (l_2 - y)^2}} \right] \text{N/m} \qquad \ldots (4.53)$$

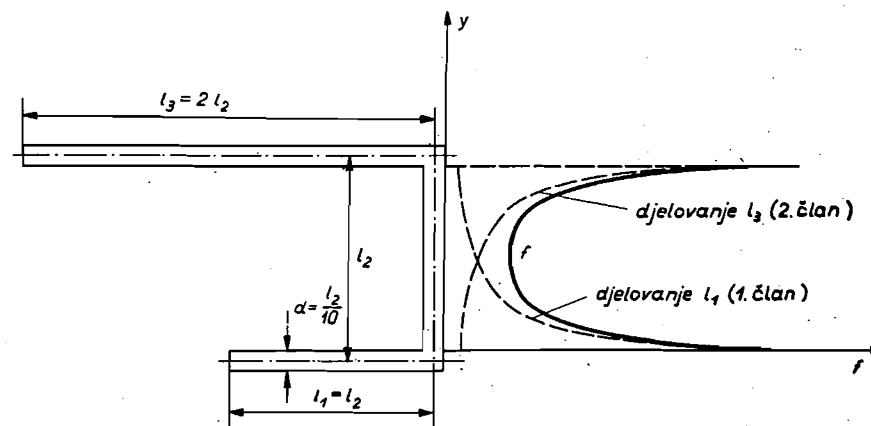
Uz pretpostavku da je $l_1 = l_3 = \infty$, dobivamo

$$f_\infty = \frac{dF}{dy} = I^2\, 10^{-7} \left(\frac{1}{y} + \frac{1}{l_2 - y} \right) \text{N/m} \qquad \ldots (4.54)$$

Na sl. 4.17. prikazane su veličine f uz pretpostavku da je $l_1 = l_2$ i $l_3 = 2\, l_2$. Uz navedene pretpostavke sila f_∞ vrlo se malo razlikuje se sile f.



Slika 4.16. Određivanje sile na srednji dio vodiča savijenog u obliku slova U



Slika 4.17. Sila po jedinici duljine f (4.53) na srednji dio vodiča savijenog u obliku slova U

Sile između vodiča različitih faza, koji su međusobno okomite, znatno su manje od sila među tako postavljenim vodičima iste faze, pa ih možemo zanemariti (Lit. 27), a da ne nastanu veće pogreške.

c) Vrsta kratkog spoja i sile među vodičima

Pođimo od pretpostavke da se radi o okruglim vodičima relativno malog promjera u odnosu na njihovu međusobnu udaljenost (a), te da je duljina vodiča u odnosu na njihov razmak velika. Tada možemo pri određivanju sile među vodičima upotrijebiti izraz (4.23).

U slučaju dvopolnog kratkog spoja kroz dva vodiča protječu struje čije momentane vrijednosti možemo prikazati izrazima (uz pretpostavku da je kratki spoj nastao u fazama R i S)

$$i_R = I_{m2} [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \qquad \ldots (4.55a)$$

$$i_S = - I_{m2} [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \qquad \ldots (4.55b)$$

U (4.55) kut α karakterizira moment nastanka kratkog spoja, dok je T_a vremenska konstanta istosmjerne komponente struje kratkog spoja definirana relacijom (3.202c). Za $\alpha = \frac{\pi}{2}$ kratki spoj će nastati u trenutku kad napon bude prolazio kroz nulu, dok će se za $\alpha = 0°$ nastanak kratkog spoja vremenski poklapati s maksimalnom vrijednošću napona.

Za struju kratkog spoja možemo upotrijebiti izraze (4.55), jer praktički razmatramo samo prvu polovinu periode nakon nastanka kratkog spoja, pa u tom razdoblju možemo pretpostaviti da se reaktancija generatora ne mijenja, odnosno da su vremenske konstante $T_d'' = T_d' = \infty$.

Momentanu vrijednost sile među vodičima možemo dakle odrediti izrazom

$$f_2 = 2 \frac{i_R \, i_S}{a} 10^{-7} \text{ N/m} \qquad \ldots (4.56)$$

odnosno izrazom — ako uzmemo u obzir relacije (4.55)

$$f_2 = -2 \frac{I_{m2}^2}{a} [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha]^2 \, 10^{-7} \text{ N/m} \qquad \ldots (4.57)$$

Da bismo izbjegli apsolutne vrijednosti, jer želimo usporediti prilike za različite vrste kratkog spoja, definirajmo momentane vrijednosti sile u odnosu na silu koja djeluje kad u vodičima teče tjemena vrijednost samo izmjenične komponente struje kratkog spoja. Ta sila iznosi

$$f_{20} = -2 \frac{I_{m2}^2}{a} \, 10^{-7} \text{ N/m} \qquad \ldots (4.57a)$$

pa je relativna momentana vrijednost sile

$$\varphi_2 = \frac{f_2}{f_{20}} = [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha]^2 \qquad \ldots (4.58)$$

Uzmemo li još u obzir da je tjemena vrijednost izmjenične komponente struje dvopolnog kratkog spoja

$$I_{m2} = \sqrt{2} \frac{\sqrt{3}\, V}{X_d'' + X_i} \text{ A} \qquad \ldots (4.59)$$

gdje je V efektivna vrijednost faznog napona, dobivamo

$$f_{20} = -\frac{12}{a} \frac{V^2}{(X_d'' + X_i)^2} 10^{-7} \text{ N/m} \qquad \ldots (4.60)$$

Odredimo uz koje uvjete i kada se pojavljuje maksimalna sila, čija je momentana vrijednost funkcija vremena t i kuta α. Parcijalnim deriviranjem dobivamo uvjete ekstrema. Parcijalne su derivacije

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = 2 [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \cdot \left[\omega \cos(\omega t - \alpha) - \frac{1}{T_a} e^{-t/T_a} \sin \alpha\right] = 0 \qquad \ldots (4.61a)$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} = -2 [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \cdot [\cos(\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a} \cos \alpha] = 0 \qquad \ldots (4.61b)$$

Iz (4.61a) i (4.61b) slijedi

$$\omega \cos(\omega t - \alpha) = \frac{1}{T_a} e^{-t/T_a} \sin \alpha \qquad \ldots (4.62a)$$

$$\cos(\omega t - \alpha) = e^{-t/T_a} \cos \alpha \qquad \ldots (4.62a)$$

pa je

$$\operatorname{tg} \alpha = \omega T_a \qquad \ldots (4.63)$$

gdje je α kut pri kojem se za određenu vremensku konstantu postiže maksimalna sila na sabirnicu. Uvrštavanjem (4.63) u bilo koju jednadžbu (4.61), odnosno (4.62), dobivamo

$$\omega T_a \sin \omega t + \cos \omega t = e^{-t/T_a} \qquad \ldots (4.64)$$

odakle možemo odrediti vrijeme t kad dolazi do maksimalne sile na sabirnicu.

Može se pokazati pomoću drugih parcijalnih derivacija da se radi o maksimumu, ali taj izvod nećemo prikazati radi opsežnosti. To vrijedi i za ostale razmatrane vrste kratkog spoja.

I kut α i vrijeme t ovisni su samo o vremenskoj konstanti T_a. Na sl. 4.18. prikazane su momentane relativne vrijednosti sile prema relaciji (4.58) za nekoliko vrijednosti vremenske konstante T_a, a za kut α pri kojem se postiže maksimalna sila.

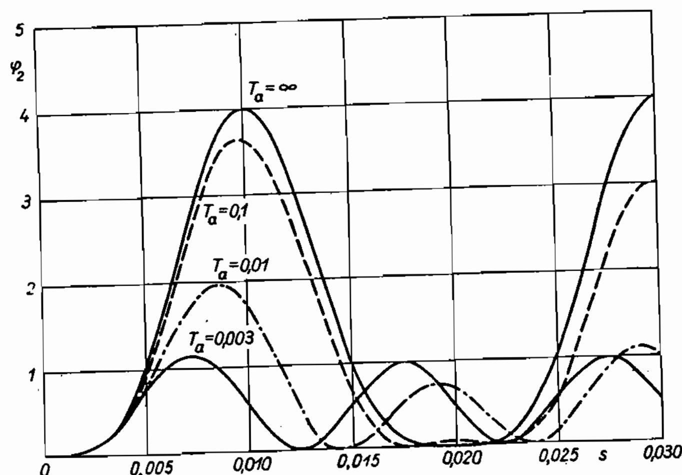
Pri tropolnom kratkom spoju možemo razlikovati silu na srednji od sile na krajnji vodič (sl. 4.19), budući da su normalno sabirnice postavljene u istoj ravnini.

Promotrimo najprije silu na srednji vodič. Momentane vrijednosti sile možemo odrediti iz relacije

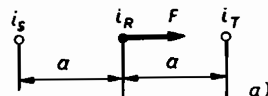
$$f_{3s} = 2 \frac{i_R}{a} (i_S - i_T) \, 10^{-7} \text{ N/m} \qquad \ldots (4.65)$$

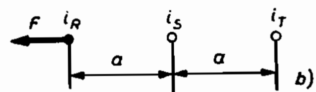
jer uz isti smjer struja u fazama S i T sile na vodič R djeluju u suprotnim smjerovima. Uzmimo u obzir relacije za struje u slučaju tropolnog kratkog spoja

$$i_R = I_{m3} [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \qquad \ldots (4.66a)$$



Slika 4.18. Momentane relativne vrijednosti sila kod dvopolnog kratkog spoja uz različite vremenske konstante (T_a) istosmjerne komponente struje kratkog spoja





Slika 4.19. Sila na srednji (a) i krajnji (b) vodič za slučaj tropolnog kratkog spoja

$$i_S = I_{m3}\left[\sin\left(\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + e^{-t/T_a}\sin\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \quad \ldots (4.66b)$$

$$i_T = I_{m3}\left[\sin\left(\omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) + e^{-t/T_a}\sin\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \quad \ldots (4.66c)$$

pa ćemo nakon rastavljanja sinusâ zbrojeva i razlikâ dobiti

$$f_{3s} = -2\sqrt{3}\,\frac{I^2_{m3}}{a}\,[\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a}\sin\alpha]\cdot$$

$$\cdot\,[\cos(\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a}\cos\alpha]\,10^{-7}\ \mathrm{N/m} \quad \ldots (4.67)$$

Tjemena vrijednost izmjenične komponente struje tropolnog kratkog spoja jest

$$I_{m3} = \sqrt{2}\,\frac{V}{X_d''} \quad \ldots (4.68)$$

pa uzimanjem u obzir (4.60), relativna vrijednost sile na srednji vodič iznosi

$$\varphi_{3s} = \frac{f_{3s}}{f_{20}} = \frac{4}{\sqrt{3}}\,[\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a}\sin\alpha]\cdot$$

$$\cdot\,[\cos(\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a}\cos\alpha] \quad \ldots (4.69)$$

Pri određivanju φ_{3s} treba uzeti u obzir da je $X_i \cong X_d''$.

I sada iz parcijalnih derivacija možemo odrediti uvjete ekstrema. Parcijalne su derivacije

$$\frac{\partial\varphi_{3s}}{\partial t} = -\frac{4}{\sqrt{3}}\,[\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a}\sin\alpha]\cdot$$

$$\cdot\,\left[\omega\sin(\omega t - \alpha) - \frac{1}{T_a}e^{-t/T_a}\cos\alpha\right] +$$

$$+\,\frac{4}{\sqrt{3}}\,[\cos(\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a}\cos\alpha]\cdot$$

$$\cdot\,\left[\omega\cos(\omega t - \alpha) - \frac{1}{T_a}e^{-t/T_a}\sin\alpha\right] = 0 \quad \ldots (4.70a)$$

$$\frac{\partial\varphi_{3s}}{\partial\alpha} = \frac{4}{\sqrt{3}}\,[\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a}\sin\alpha]^2 -$$

$$-\,\frac{4}{\sqrt{3}}\,[\cos(\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a}\cos\alpha]^2 = 0 \quad \ldots (4.70b)$$

Iz (4.70b) jedno je rješenje

$$\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a}\sin\alpha = -\cos(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a}\cos\alpha \quad \ldots (4.71)$$

dok iz (4.70a), uzevši u obzir (4.71), dobivamo

$$\omega\sin(\omega t - \alpha) - \frac{1}{T_a}e^{-t/T_a}\cos\alpha = -\omega\cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{T_a}e^{-t/T_a}\sin\alpha \quad \ldots (4.72)$$

pa odatle

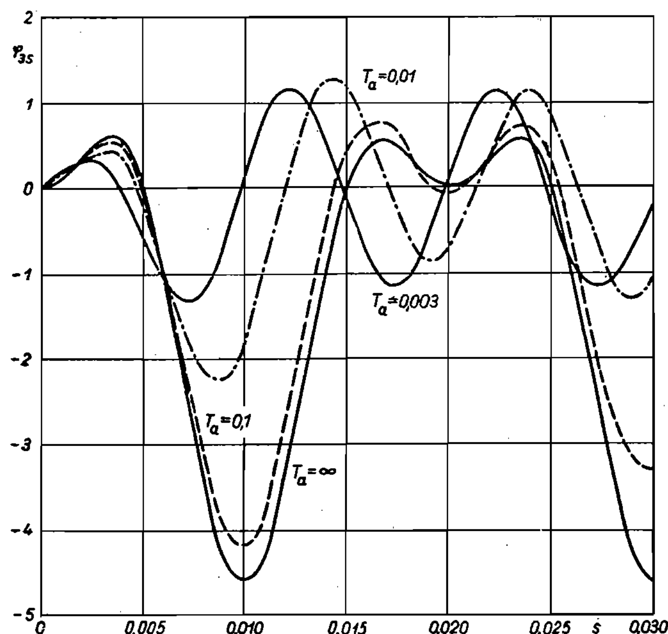
$$\omega T_a(\cos\alpha - \sin\alpha) = \sin\alpha + \cos\alpha. \quad \ldots (4.73)$$

Dijeljenjem sa $\cos\alpha$, a nakon sređivanja, dobivamo relaciju

$$\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{\omega T_a - 1}{\omega T_a + 1} \quad \ldots (4.74)$$

kojom je definiran kut α, pri kojem se postiže maksimalna sila na srednji vodič. Uvrštavanjem (4.74) u uređeni izraz (4.71) dolazimo do iste relacije kao pri dvopolnom kratkom spoju (4.64), kojom je određen moment u kojem se javlja maksimalna sila.

Na sl. 4.20. prikazane su momentane relativne vrijednosti sile na srednji vodič za iste vremenske konstante kao i za slučaj dvopolnog kratkog spoja.



Slika 4.20. Momentane relativne vrijednosti sila na srednji vodič (sl. 4.19a) za slučaj tropolnog kratkog spoja uz različite vremenske konstante (T_a) istosmjerne komponente struje kratkog spoja

Momentanu vrijednost sile na vanjski vodič (sl. 4.19b) u slučaju tropolnog kratkog spoja možemo prikazati relacijom

$$f_{3v} = 2 \frac{i_R}{a} \left(i_S + \frac{i_T}{2} \right) 10^{-7} \text{ N/m.} \quad \ldots (4.75)$$

Uzimajući u obzir (4.66) i nakon uređenja dobivamo

$$f_{3v} = -\frac{I^2_{m3}}{a} \left\{ \frac{3}{2} [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha]^2 + \right.$$

$$+ \frac{\sqrt{3}}{2} [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha]^2 \cdot$$

$$\left. \cdot [\cos(\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a} \cos \alpha] \right\} 10^{-7} \quad \ldots (4.76)$$

Iz (4.76), uvaživši (4.60) kao i odnos $X_i \cong X_d''$, dolazimo do momentane relativne vrijednosti sile na vanjski vodič

$$\varphi_{3v} = \frac{f_{3v}}{f_{2o}} = [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha]^2 +$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{3}} [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \cdot$$

$$\cdot [\cos(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \quad \ldots (4.77)$$

Sada su parcijalne derivacije

$$\frac{\partial \varphi_{3v}}{\partial t} = 2 [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \cdot$$

$$\cdot [\omega \sin(\omega t - \alpha) - \frac{1}{T_a} e^{-t/T_a} \sin \alpha] -$$

$$- \frac{1}{\sqrt{3}} [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \cdot$$

$$\cdot [\omega \cos(\omega t - \alpha) - \frac{1}{T_a} e^{-t/T_a} \cos \alpha] +$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{3}} [\cos(\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a} \cos \alpha] \cdot$$

$$\cdot [\omega \cos(\omega t - \alpha) - \frac{1}{T_a} e^{-t/T_a} \sin \alpha] = 0 \quad \ldots (4.78a)$$

$$\frac{\partial \varphi_{3v}}{\partial \alpha} = -2 [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \cdot$$

$$\cdot [\cos(\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a} \cos \alpha] +$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{3}} [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha]^2 -$$

$$- \frac{1}{\sqrt{3}} [\cos(\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a} \cos \alpha]^2 = 0 \quad \ldots (4.78b)$$

Iz (4.78b) dobivamo

$$\frac{\cos(\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a} \cos \alpha}{\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha} =$$

$$= -2\sqrt{3} + \frac{\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha}{\cos(\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a} \cos \alpha} \quad \ldots (4.79)$$

Dijeljenjem (4.78a) sa $\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha$, te uvrštavanjem vrijednosti (4.79), imamo

$$[\omega \sin(\omega t - \alpha) - \frac{1}{T_a} e^{-t/T_a} \cos \alpha] \cdot [\cos(\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a} \cos \alpha] =$$

$$= [\omega \cos(\omega t - \alpha - \frac{1}{T_a} e^{-t/T_a} \sin \alpha] \cdot$$

$$\cdot [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \qquad \dots (4.80)$$

Rastavljanjem sinusâ i kosinusâ razlikâ, a nakon skraćivanja, dolazimo do izraza (4.64). Uvrštavanjem vrijednosti iz (4.64) u (4.78b) dobivamo

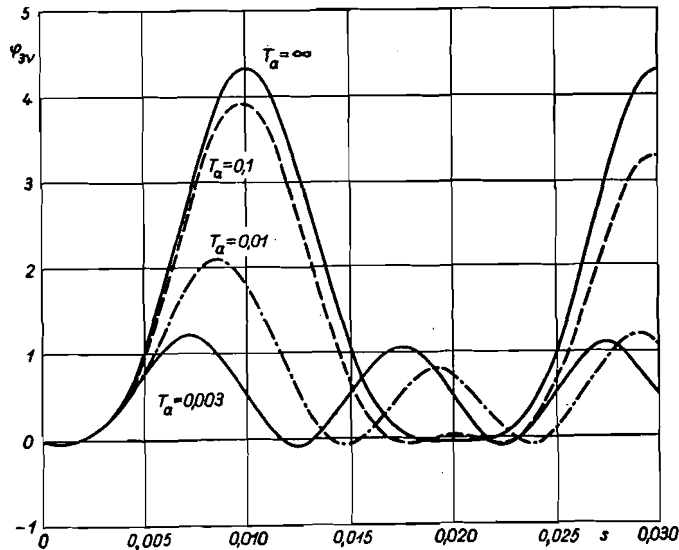
$$\sin^2 \omega t [2\sqrt{3}(1 + \omega T_a \operatorname{tg} \alpha)(\omega T_a - \operatorname{tg}\alpha) +$$
$$+ (1 + \omega T_a \operatorname{tg} \alpha)^2 - (\operatorname{tg} \alpha - \omega T_a)^2] = 0 \qquad \dots (4.81)$$

Iz izraza u uglatim zagradama određujemo

$$\operatorname{tg} \alpha = A \pm \sqrt{A^2 + 1} \qquad \dots (4.82)$$

$$A = -\frac{1}{2} \frac{2\sqrt{3}[(\omega T_a)^2 - 1] + 4 \omega T_a}{(\omega T_a)^2 - 1 - 2\sqrt{3}\omega T_a} \qquad \dots (4.83)$$

Na sl. 4.21. prikazane su momentane relativne vrijednosti sile na vanjski vodič prema (4.77) za iste vrijednosti vremenskih konstanta kao i na sl. 4.18. i 4.20, uzimajući u obzir kut α koji daje maksimalnu vrijednost sile za pojedinu vremensku konstantu.



Slika 4.21. Momentane relativne vrijednosti sila na vanjski vodič (sl. 4.19b) za slučaj tropolnog kratkog spoja uz različite vremenske konstante (T_a) istosmjerne komponente struje kratkog spoja

Pri dvopolnom kratkom spoju s istodobnim spojem sa zemljom možemo struje u fazama, između kojih je došlo do kratkog spoja, prikazati relacijama

$$i_R = I_{m2z} [\sin(\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \qquad \dots (4.84a)$$

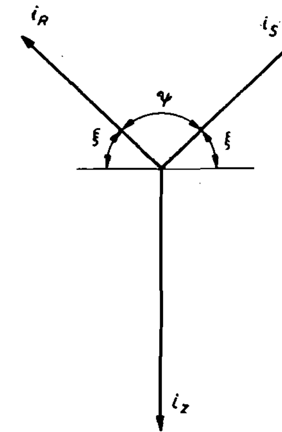
$$i_S = I_{m2z} [\sin(\omega t - \alpha - \psi) + e^{-t/T_a} \sin(\alpha + \psi)] \qquad \dots (4.84b)$$

gdje su I_{m2z} tjemena vrijednost izmjenične komponente struje, a ψ kut između struja u dvjema fazama (sl. 4.22). Tjemena je vrijednost struje

$$I_{m2z} = \sqrt{2}\sqrt{3}\, V \frac{\sqrt{\left(\frac{X_d''}{X_o}\right)^2 + \frac{X_d''}{X_o} + 1}}{X_d'' \left(\frac{X_d''}{X_o} + 2\right)} \qquad \dots (4.84c)$$

gdje X_o nulta reaktancija. Izraz (4.84c) slijedi iz (3.131) kad postavimo $X_i = X_d''$. Za kut ψ možemo postaviti (sl. 4.22)

$$\psi = \pi - 2\xi \qquad \dots (4.85)$$



Slika 4.22. Struje u slučaju dvopolnog kratkog spoja s istodobnim spojem sa zemljom

Veličina kuta ξ slijedi iz (3.81), pa je

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{\sqrt{3}\frac{X_d''}{X_o}}{\frac{X_d''}{X_o} + 2} \qquad \dots (4.86)$$

Sila na vodič određena je izrazom

$$f_{2z} = 2 \frac{i_R i_S}{a} 10^{-7} \text{ N/m} \qquad \dots (4.87)$$

iz čega uvrštavanjem vrijednosti iz (4.84), a nakon sređivanja, dobivamo

$$f_{2z} = 12 \frac{V^2}{a} \frac{\left(\frac{X_d''}{X_o}\right)^2 + \frac{X_d''}{X_o} + 1}{X_d''^2 \left(\frac{X_d''}{X_o} + 2\right)^2} \cdot$$

$$\cdot \{\cos \psi [\sin (\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha]^2 -$$

$$- \sin \psi [\sin (\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \cdot$$

$$\cdot [\cos (\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a} \cos \alpha]\} \qquad \ldots (4.88)$$

dok su relativne vrijednosti sile — uzevši u obzir (4 57a)

$$\varphi_{2z} = -4 \frac{\left(\frac{X_d''}{X_o}\right)^2 + \frac{X_d''}{X_o} + 1}{\left(\frac{X_d''}{X_o} + 2\right)^2} \cdot$$

$$\cdot \{\cos \psi [\sin (\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha]^2 -$$

$$- \sin \psi [\sin (\omega t - \alpha) + e^{-t/T_a} \sin \alpha] \cdot$$

$$\cdot [\cos (\omega t - \alpha) - e^{-t/T_a} \cos \alpha]\} \qquad \ldots (4.89)$$

Istim razmatranjem kao onim za silu na vanjski vodič pri tropolnom kratkom spoju, jer (4.89) ima sličan oblik kao (4.77), dolazimo do uvjeta maksimuma, a ta dva uvjeta su: relacije (4.64) i (4.82), gdje je

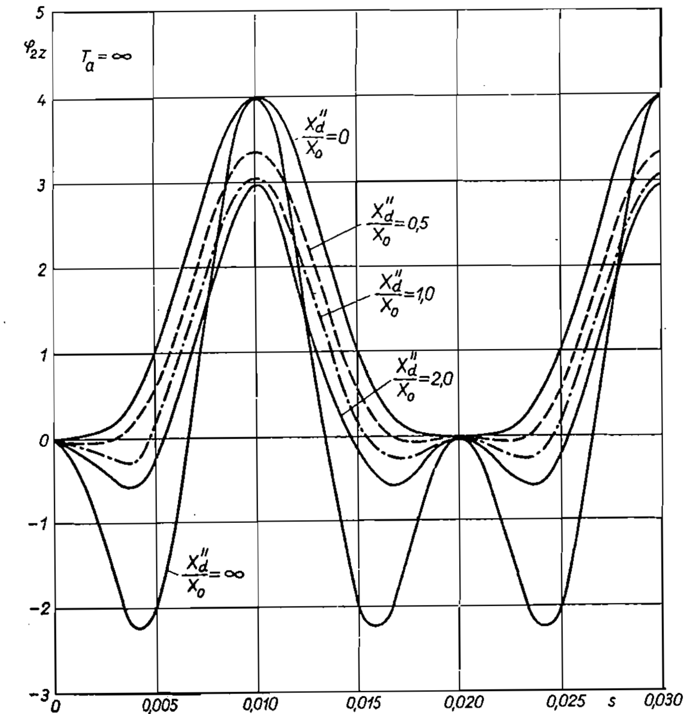
$$A = \frac{1}{2} \frac{2 \operatorname{cotg} \psi [(\omega T_a)^2 - 1] - 4 \omega T_a}{(\omega T_a)^2 - 1 + 2 \omega T_a \operatorname{cotg} \psi} \qquad \ldots (4.90)$$

Sila na vodič ne ovisi samo o t i α nego i o kutu ψ, koji je funkcija omjera između direktne i nulte reaktancije (4.85) i (4.86). Kako iz već provedenih razmatranja možemo konstatirati da vremenska konstanta ne može izmijeniti odnos između veličina sila za različite vrste kratkog spoja, dovoljno je razmotriti relativnu veličinu sile za $T_a = \infty$. Tada je (4.90) $A = \operatorname{cotg} \psi$, pa je (4.82)

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{cotg} \psi - \sqrt{\operatorname{cotg}^2 \psi + 1} \qquad \ldots (4.91)$$

Na sl. 4.23. prikazane su momentane relativne vrijednosti sile za različite vrijednosti X_d''/X_o. Vidi se da ni u jednom slučaju sila ne postaje veća od one sile koja se pojavljuje pri dvopolnom kratkom spoju, ali bez dodira sa zemljom. Za $X_d''/X_o = 0$ imamo potpuno iste prilike kao i pri dvopolnom kratkom spoju ($\psi = \pi$).

Ako usporedimo relativne maksimalne sile koje djeluju na vodič za različite slučajeve kratkog spoja (sl. 4.24), možemo konstatirati da maksimalne sile djeluju pri tropolnom kratkom spoju i to na srednji vodič, pa su za mehaničko dimenzioniranje sabirnica mjerodavne struje tropolnog kratkog spoja.



Slika 4.23. Momentalne relativne vrijednosti sila za slučaj dvopolnog kratkog spoja s istodobnim spojem sa zemljom za vremensku konstantu $T_a = \infty$, a za različite omjere X_d''/X_o

Pri određivanju te maksimalne sile možemo upotrijebiti relaciju

$$f_{3s} = 2 \varphi \frac{I^2_{k3}}{a} 10^{-7} \text{ N/m} \qquad \ldots (4.92)$$

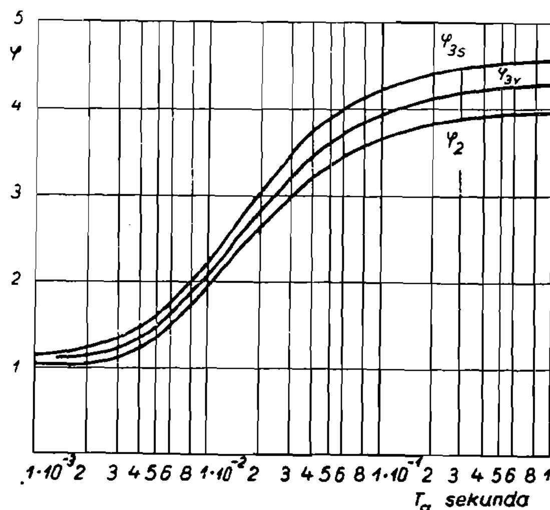
gdje je I_{k3} efektivna vrijednost izmjenične komponente struje tropolnog kratkog spoja neposredno nakon nastanka kratkog spoja, dakle je

$$I_{k3} = \frac{V}{X_d''} \qquad \ldots (4.93)$$

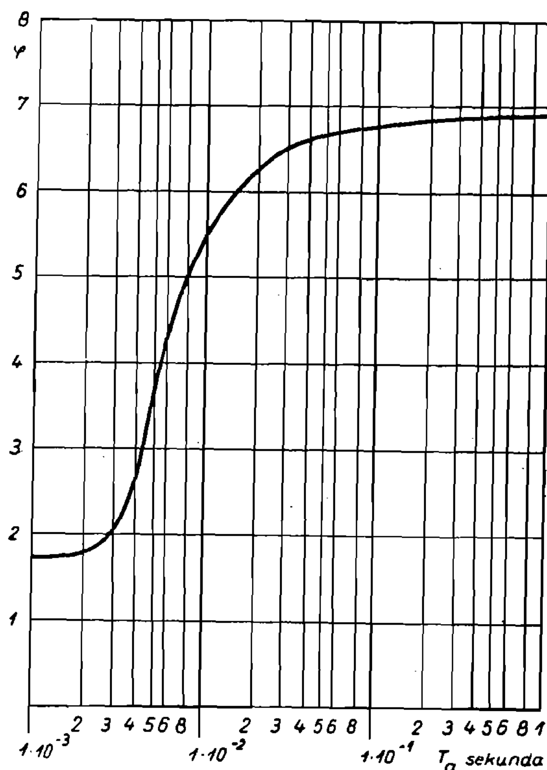
dok je φ veličina ovisna o vremenskoj konstanti, a definirana relacijom koja slijedi iz (4.67)

$$\varphi = 2 \sqrt{3} [\sin (\omega t_o - \alpha_o) + e^{-t_o/T_a} \sin \alpha_o] \cdot$$

$$\cdot [\cos (\omega t_o - \alpha_o) - e^{-t_o/T_a} \cos \alpha_o] \qquad \ldots (4.94)$$

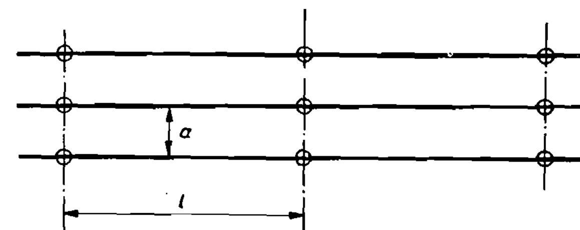


Slika 4.24. Maksimalne relativne vrijednosti sila za slučaj dvopolnog i tropolnog kratkog spoja



Slika 4.25. Ovisnost veličine φ (4.94) o vremenskoj konstanti T_a

gdje su t_o i α_o vrijeme (nakon nastanka kratkog spoja) i kut kada odnosno pri kojem se pojavljuje maksimalna sila. Vrijeme t_o određeno je relacijom (4.64), a kut α_o slijedi iz izraza (4.74). Na sl. 4.25. prikazana je ovisnost veličine φ o vremenskoj konstanti, jer je φ ovisno samo o toj



Slika 4.26. Pogled odozgo na najčešću izvedbu sabirnica

veličini. Vremenska konstanta ovisi o omjeru R/X_d'', kako je to pokazano u trećem poglavlju. Vrijednost veličine φ varira u vrlo širokim granicama, od $\varphi = \sqrt{3}$ do $\varphi = 4\sqrt{3}$. Minimalna vrijednost postiže se za $T_a = 0$, a maksimalna $T_a = \infty$. U blizini generatora φ će dakle imati veliku, a daleko od generatora (npr. u niskonaponskoj mreži) malu vrijednost.

d) Naprezanje sabirnica

Sabirnice možemo shvatiti kao ukliještenu gredu s jednolikim kontinuiranim opterećenjem. Razmak među osloncima l jednak je razmaku među potpornim izolatorima (sl. 4.26). Moment savijanja možemo odrediti iz formule (Lit. 33)

$$M = -\frac{f\,l^2}{2}\left(\frac{1}{6} - \frac{x}{l} + \frac{x^2}{l^2}\right)\text{Nm} \qquad \ldots (4.95)$$

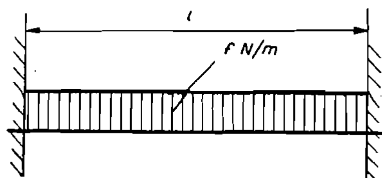
gdje je f sila po jedinici duljine pri tropolnom kratkom spoju prema (4.92), a x udaljenost od jednog oslonca. Ovisnost momenta savijanja o udaljenosti od oslonca prikazana je na sl. 4.27. Maksimalni je moment savijanja

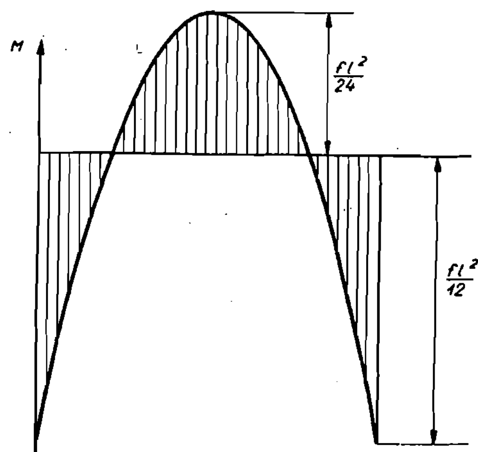
$$M_{max} = \frac{f\,l^2}{12}\ \text{Nm} \qquad \ldots (4.97)$$

pa je to mjerodavni moment za dimenzioniranje sabirnica. Izostavljen je predznak, jer naprezanje o njemu ne ovisi. Sabirnice su napregnute na savijanje, pa se naprezanje određuje iz omjera momenta savijanja i momenta otpora (W)

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W}\ \text{N/m}^2 \qquad \ldots (4.98)$$

Momenti otpora za plosnate i okrugle sabirnice naznačeni su na sl. 4.28, a u tab. 4.7. za U-profile (dimenzije U-profila navedene su u tab. 4.5). Prelazom na Međunarodni sistem jedinica naprezanja su izražena u nju-





Slika 4.27. Moment savijanja kontinuirano opterećene grede uklještene na oba kraja

TABLICA 4.7.

Momenti otpora i tromosti U-profila

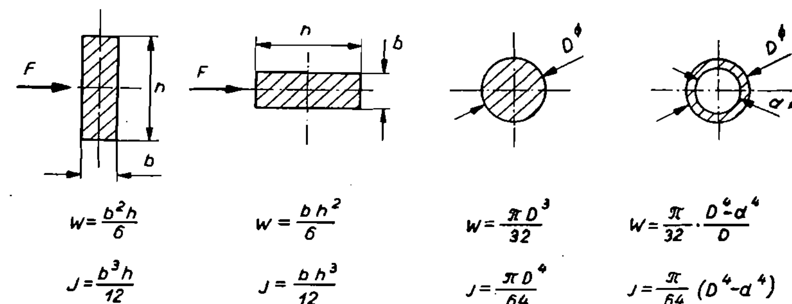
Oznaka	W 10^{-6} m³	J 10^{-8} m⁴	W 10^{-6} m³	J 10^{-8} m⁴
5	1,20	2,07	5,24	13,1
6	1,76	3,71	7,88	23,5
7	2,57	5,87	12,40	43,4
8	4,08	10,70	19,38	77,5
10	5,38	14,20	33,4	167
12	9,63	30,53	59,3	356
14	14,54	54,15	90,3	632
16	20,87	89,22	130	1042
18	28,77	138,90	180	1622
20	38,43	206,72	241	2414

(Prva dva stupca W, J: profil opterećen silom F okomito na hrbat; druga dva: profil opterećen silom F paralelno s hrptom.)

tonima po m², pa naprezanja izražena Tehničkim sistemom jedinica u kp/cm² preračunavamo ovako

$$1\ \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} = 9{,}81 \cdot 10^4\ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \qquad \ldots (4.99)$$

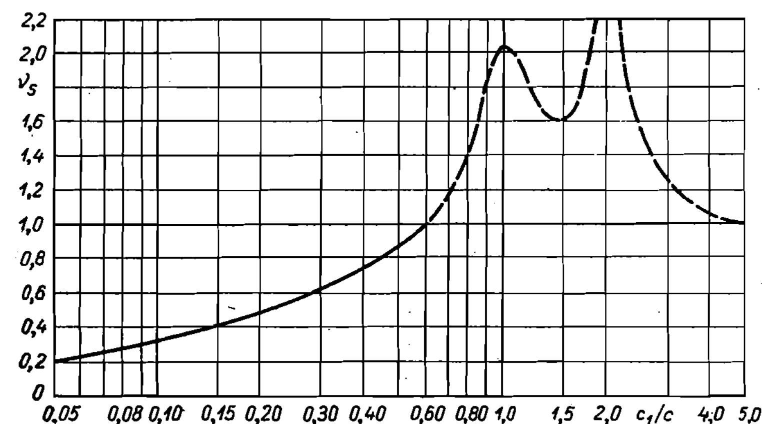
Pomoću (4.99) možemo dopuštena naprezanja u kp/cm², kako se obično nalaze u priručnicima, preračunati u N/m².



Slika 4.28. Moment otpora i tromosti plosnatih i okruglih sabirnica

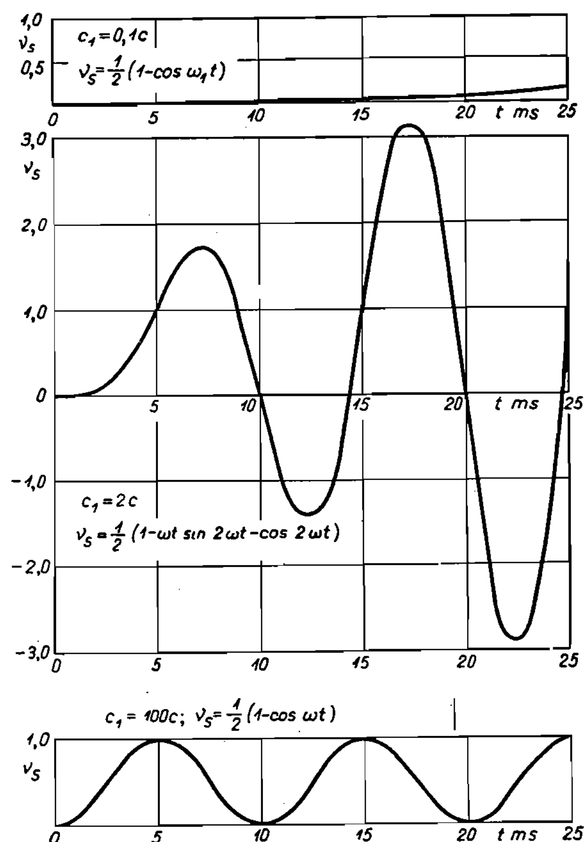
Naprezanje prema (4.98) bilo bi postignuto kad bi sila koja djeluje na sabirnicu bila konstantna. Radi promjene sile dolazi do titranja sabirnica, na koje utječe i vlastita frekvencija samih sabirnica. Ta promjena naprezanja uzima se u obzir frekventnim faktorom ν_S, pa (4.98) glasi

$$\sigma = \nu_S \frac{M_{max}}{W} \qquad \ldots (4.100)$$



Slika 4.29. Ovisnost frekventnog faktora sabirnice (ν_S) o omjeru vlastite frekvencije sabirnice (c_1) i frekvencije mreže (c)

Uz pretpostavku da naprezanje sabirnice ne prelazi granicu elastičnosti (Lit. 38), frekventni faktor ν_S možemo odrediti iz dijagrama na sl. 4.29. Frekventni faktor ovisi o omjeru vlastite frekvencije sabirnice (c_1) i frekvencije mreže (c). Za vlastite frekvencije znatno manje od frekvencije mreže ($c_1 \ll c$) promjena frekventnog faktora mijenja se s frekvencijom c_1 (Lit. 34), pa maksimum nastupa znatno nakon nastanka kratkog spoja, kad već nastaje smanjenje sile radi prigušenja. Radi toga je i frekventni faktor manji od 1. Kad je $c_1 = 2\,c$ dolazi do najvećih naprezanja, jer se frekventni faktor stalno povećava, a kad je $c_1 \gg c$ sabirnica titra u ritmu sile koja na nju djeluje, pa je zbog toga za vrlo visoke vlastite frekvencije i frekventni faktor $\nu_S = 1$. Na sl. 4.30. prikazana je ovisnost frekventnog faktora o vremenu za tri različite visine



Slika 4.30. Ovisnost promjene frekventnog faktora (ν_S) za $c_1 \ll c$, $c_1 = 2c$ i $c_1 \gg c$. Sila se mijenja po zakonu $\varphi = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\,\omega\,t)$

vlastite frekvencije sabirnice. U dijagramima na sl. 4.30. nije uzeto u obzir prigušenje, pa oni služe samo kao ilustracija.

Za sabirnice dopušteno je naprezanje do konvencionalne granice tečenja $\sigma_{0,2}$ (Lit. 24); to je granično naprezanje pri kojem trajna deformacija ne prelazi vrijednost 0,2%. Budući da je sabirnica opterećena na savijanje, maksimalno vlačno naprezanje pojavit će se na izbočenom rubu sabirnice, dok će najveće tlačno naprezanje biti na udubljenom rubu sabirnice. Uz izvjesna zanemarenja, dijagrami rastezanja za bakar i aluminij mogu se prikazati sa dva pravca (sl. 4.31a). Ako pretpostavimo da promatrani presjek sabirnice za vrijeme opterećenja ostaje ravan, moment savijanja s obzirom na neutralnu os presjeka može se prikazati izrazom

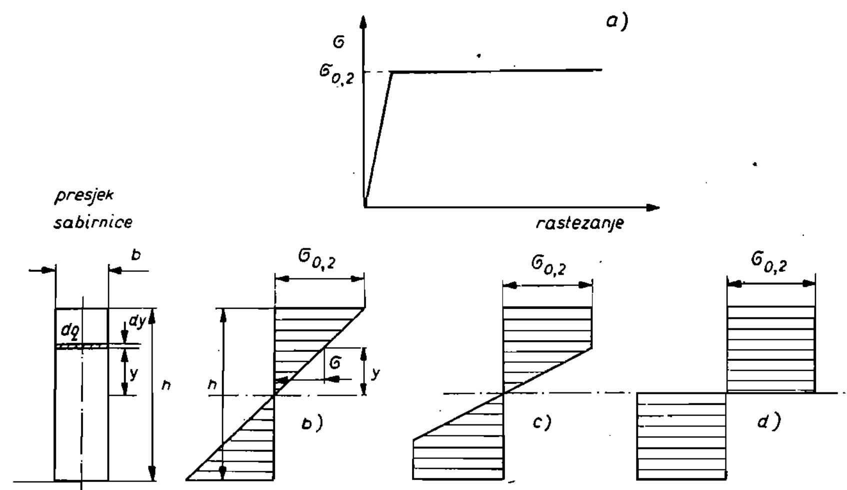
$$M = \int_{-h/2}^{h/2} y\,\sigma\,\mathrm{d}q \qquad \ldots (4.101)$$

gdje su y udaljenost elementarnog presjeka dq od neutralne osi, a σ naprezanje tog elementarnog presjeka. Raspodjela naprezanja u poprečnom presjeku sabirnice, kad moment savijanja postigne toliku vrijednost da na rubu sabirnice zavlada naprezanje $\sigma_{0,2}$, prikazana je na sl. 4.31b. Tada je naprezanje određeno relacijom

$$\sigma = 2\,\frac{y}{h}\,\sigma_{0,2} \qquad \ldots (4.102a)$$

pa je za pravokutni presjek

$$\mathrm{d}q = b\,\mathrm{d}y \qquad \ldots (4.102b)$$



Slika 4.31. Naprezanje po presjeku sabirnice: (b) pri opterećenju kad je na rubovima naprezanje upravo jednako granici tečenja $\sigma_{0,2}$, (c) za daljnje povećanje opterećenja i (d) za opterećenje kad je na cijelom presjeku postignuta granica tečenja, a uz pretpostavku da odnos naprezanje—rastezanje odgovara dijagramu (a)

gdje su h visina, a b širina sabirnice, pa je moment savijanja prema (4.101)

$$M_1 = \sigma_{0,2} \frac{b\,h^2}{6} = \sigma_{0,2}\, W \qquad \ldots (4.103)$$

jer je $\frac{b\,h^2}{6}$ moment otpora pravokutnog presjeka. Daljnjim povećanjem opterećenja naprezanje na rubu neće moći dalje rasti, jer je već postignuta granica tečenja, pa je materijal postao plastičan, ali će granicu tečenja dostići i oni dijelovi presjeka koji se nalaze dalje od ruba (sl. 4.31b). Kad se i u sredini presjeka, u njegovoj neutralnoj osi, postigne granica tečenja, naprezanje će se moći prikazati kao na sl. 4.31c. Tada je $\sigma = \sigma_{0,2}$, pa uvrštavanjem u (4.101) dobivamo

$$M_2 = \sigma_{0,2} \frac{b\,h^2}{4} = 1{,}5\, \sigma_{0,2}\, W = 1{,}5\, M_1 \qquad \ldots (4.104)$$

Prema tome, ako dopustimo da se materijal sabirnice optereti do granice tečenja, tj. da naprezanje smije postići vrijednost $\sigma_{0,2}$, moment savijanja mogao bi biti za 50% veći od onoga koji bi bio dopušten kad bismo dopustili da se samo na rubu sabirnice pojavi naprezanje $\sigma_{0,2}$.

Pri određivanju naprezanja mora se, osim toga, voditi računa i o slijedećem: kada se dostigne granica tečenja dolazi do popuštanuja materijala na mjestu uklještenja, jer se baš tu pojavljuje i najveći moment savijanja. Radi toga više nemamo toliki moment savijanja, pa je sada taj moment $\frac{f\,l^2}{16}$ mjesto $\frac{f\,l^2}{12}$, kakav je vladao dok je naprezanje odgovaralo prilikama prikazanim na sl. 4.31b. Kad i to uzmemo u obzir, možemo postaviti

$$M' = \frac{4}{3}\, 1{,}5\, \sigma_{0,2}\, W = 2\, \sigma_{0,2}\, W \qquad \ldots (4.105)$$

To znači, ako provedemo račun prema (4.100), te ako pri tom uzmemo da smo moment savijanja odredili prema (4.97), možemo postaviti

$$\sigma = \nu_S \frac{M_{max}}{W} \leqq 2\, \sigma_{0,2} \qquad \ldots (4.106)$$

Postavlja se još pitanje, s kolikim frekventnim faktorom ν_S treba računati?

Najveći progib, pa prema tome i najveće naprezanje, ne nastupaju trenutno. Za njihovu veličinu mjerodavan je odnos između vlastite frekvencije sabirnice i frekvencije mreže, te mogućnost da sabirnica, koja je počela titranje kao elastičan nosač, za vrijeme titranja postane neelastična, jer je dostignuta granica tečenja. Pomoću omjera frekvencijā određen je frekventni faktor, čija je vrijednost prikazana na sl. 4.29, ali vrijedi samo onda ako se radi o elastičnom nosaču. Ispitivanjem (Lit. 34) je utvrđeno da se sabirnica vlada kao elastičan nosač za koji vrijede frekventni faktori sa sl. 4.29, ako maksimalno naprezanje nije veće od 0,8 $\sigma_{0,2}'$, gdje

je $\sigma_{0,2}'$ najveća vrijednost granice tečenja, ovisna o materijalu i profilu sabirnice. U tab. 4.8. (Lit. 25) navedeni su podaci o minimalnoj i maksimalnoj granici tečenja. Prekoračenjem te granice (0,8 $\sigma_{0,2}'$), što je dopušteno sve do 2 $\sigma_{0,2}$ — gdje je $\sigma_{0,2}$ najmanja granica tečenja — amplituda progiba smanjuje se zbog plastičnosti materijala s istodobnom promjenom vlastite frekvencije, pa zato ni ne dolazi do progiba koji su bili osnova za određivanje frekventnog faktora sa sl. 4.29. Radi toga krivulja za područje $\nu_S > 1$ nema praktičkog značenja.

TABLICA 4.8.

Najmanja i najveća granica tečenja bakrenih i aluminijskih profila koji se upotrebljavaju za sabirnice (Lit. 25)

	Širina ili debljina stijenke	Visina ili promjer	Način izrade sabirnice	Granica tečenja N/m² najmanja $\sigma_{0,2}$	Granica tečenja N/m² najveća $\sigma_{0,2}'$
Bakar					
Plosnati profili	3 do 8 mm 8 mm	sve visine	vučena ili valjana	$2{,}5 \cdot 10^8$ $1{,}5 \cdot 10^8$	$3{,}3 \cdot 10^8$ $2{,}5 \cdot 10^8$
U-profili	U 3 do U 8 U 8 do U 14	— —		$2{,}5 \cdot 10^8$ $1{,}5 \cdot 10^8$	$3{,}5 \cdot 10^8$ $2{,}5 \cdot 10^8$
Cijevi	do 3 mm 3 mm	do 60 mm		$2{,}5 \cdot 10^8$ $1{,}5 \cdot 10^8$	$3{,}3 \cdot 10^8$ $2{,}5 \cdot 10^8$
Aluminij					
Plosnati profili	do 5 mm do 10 mm do 10 mm	do 40 mm do 60 mm do 120 mm	vučena ili valjana prešana	$0{,}9 \cdot 10^8$ $0{,}8 \cdot 10^8$ $0{,}7 \cdot 10^8$ $0{,}5 \cdot 10^8$	$1{,}1 \cdot 10^8$ $1{,}0 \cdot 10^8$ $0{,}9 \cdot 10^8$ $1{,}1 \cdot 10^8$
U-profili	do U 5 U 5	— —	prešana	$0{,}8 \cdot 10^8$ $0{,}5 \cdot 10^8$	$1{,}0 \cdot 10^8$ $1{,}1 \cdot 10^8$
Cijevi	do 6 mm	sve	vučena	$0{,}6 \cdot 10^8$	$1{,}0 \cdot 10^8$

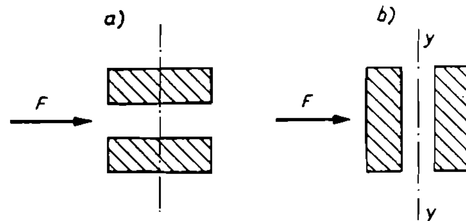
Iz svih tih razloga proračun naprezanja prema (4.106) provodimo uz pretpostavku $\nu_S = 1$, pa se zadovoljavamo ako je

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} \leqq 2\, \sigma_{0,2} \qquad \ldots (4.107)$$

Ako je, međutim, $\sigma > 2\, \sigma_{0,2}$ korisno je provesti naknadnu kontrolu pomoću frekventnog faktora (sl. 4.29), i utvrditi nije li $\nu_S < 1$, što bi moglo dovesti do zaključka da je ispunjen uvjet $\sigma \leqq 2\, \sigma_{0,2}$. Pri provođenju te naknadne kontrole potrebno je odrediti vlastitu frekvenciju sabirnice. Način određivanja vlastite frekvencije opisan je u slijedećem odsjeku.

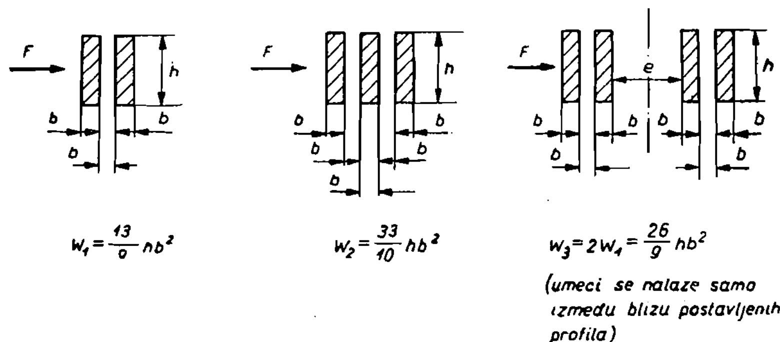
Sve dosada navedeno vrijedi za sabirnice koje su izvedene od jednog profila. Kad se radi o velikim strujama, korisno je izvesti sabirnicu od više profila.

Pri sastavljenim sabirnicama treba razlikovati naprezanje koje nastaje međusobnim djelovanjem struja u svim fazama, od naprezanja koje nastaje radi struja u vodičima iste faze. Naprezanje zbog međusobnog djelovanja struja triju faza određuje se prema (4.107), uz napomenu da moment otpora sabirnice treba odrediti uzimajući u obzir oblik, dimenzije i razmak profilâ od kojih je sastavljena sabirnica.



4.32. Smjer djelovanja sile na sastavljene sabirnice

Moment otpora sabirnice, kad sila djeluje paralelno s duljom stranicom plosnatog profila (sl. 4.32a), određen je kao zbroj momenata otpora pojedinih dijelova sabirnice. Ako je smjer sile paralelan s užom stranicom plosnatog profila (sl. 4.32b), te ako je međusobni položaj dijelova sabirnice fiksiran samo jednim umetkom, ukupni moment otpora određen je također zbrojem momenata otpora pojedinih dijelova sabirnica. Nasuprot tome, ako sila djeluje kao na sl. 4.32b, ali ako postoje dva ili više umetaka (između dva potporna izolatora) koji onemogućuju međusobni uzdužni pomak, ukupni je moment otpora radi ukrućenja veći od zbroja momenata otpora dijelova sabirnice. Može se računati da moment otpora sabirnice sastavljene od plosnatih profila sa dva ili više umetaka iznosi 60% (Lit. 24) momenta otpora dijelova određenih s obzirom na os y — y (sl. 4.32b). Za U profile treba uzeti 50% momenta otpora s obzirom na os y — y. Na sl. 4.33. navedeni su momenti otpora sastavljenih sabirnica preračunatih na označenu simetralu. Tako određene momente otpora treba pomnožiti sa 0,6, da se dobije moment otpora s kojim treba



Slika 4.33. Momenti otpora sabirnica sastavljenih od plosnatih profila

ući u daljnje račune. Podaci o momentima otpora sabirnica sastavljenih od U-profila mogu se naći u priručnicima (npr. Lit. 25).

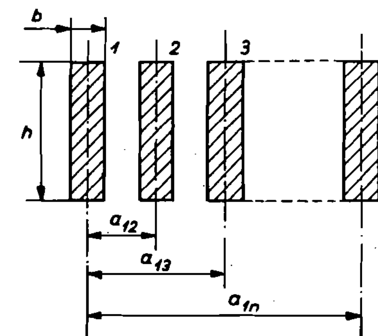
Silu, koja je posljedica međusobnog djelovanja struja u pojedinim vodičima podijeljene sabirnice, možemo odrediti iz izraza

$$f_p = 2\left(\frac{I_u}{n}\right)^2 \sum_{1}^{n} \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \, 10^{-7} \text{ N/m} \qquad \ldots (4.108)$$

gdje su: I_u udarna struja tropolnog kratkog spoja, n broj jednakih vodiča od kojih je sastavljena sabirnica, k_{1n} korekcioni faktor prema (4.41), prikazan na sl. 4.7. i to između krajnjeg i n-tog vodiča, dok je a_{1n} razmak između simetrale krajnjeg i n-tog vodiča (sl. 4.34). Potrebno je odrediti silu na krajnji vodič, jer na njega djeluje maksimalna sila. Na taj vodič djeluju, naime, sile sve u istom smjeru, što nije slučaj kad se radi o vodiču koji nije u krajnjem položaju. Prilikom određivanja korekcionog faktora k (sl. 4.7) treba uzeti u obzir da je korekcioni faktor funkcija odnosa

$$\lambda_{1n} = \frac{a_{1n} - b}{h + b} \qquad \ldots (4.109)$$

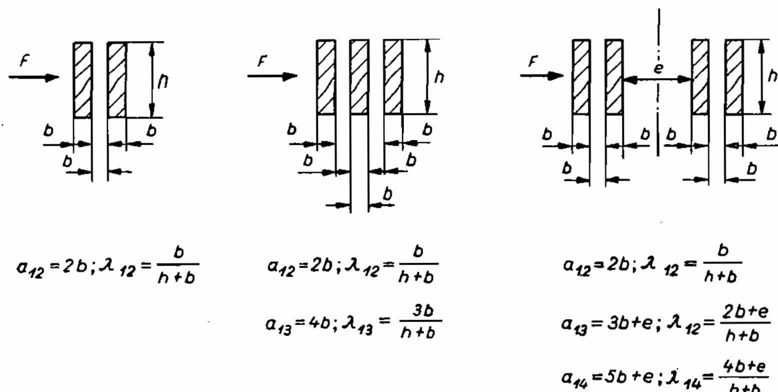
kao i omjera b/h. U račun treba uzeti struju tropolnog kratkog spoja, jer naprezanje materijala sabirnice ne ovisi samo od struje u samoj sabirnici, već i od struja u ostalim fazama. Najveće naprezanje radi struje u promatranoj sabirnici nastat će pri tropolnom ili jednopolnom kratkom spoju, ovisno o tome koja je struja veća. Pri jednopolnom kratkom spoju, međutim, nema djelovanja struja u drugim fazama, pa će ukupno naprezanje u svim praktičkim slučajevima biti najveće pri tropolnom kratkom spoju.



Slika 4.34. Udaljenosti pojedinih vodiča od krajnjeg vodiča (vodič 1) za izraz (4.108)

Na sl. 4.35. navedeni su izrazi za a_{1n} i λ_{1n} za neke najčešće izvedbe spojenih sabirnica. Često se suma u (4.108) naziva reduciranom udaljenošću, koja je definirana sa

$$\frac{1}{a_n} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \ldots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \qquad \ldots (4.110)$$



Slika 4.35. Veličine a_{1n} i λ_{1n} (4.109) za najčešće izvedbe sastavljenih sabirnica

Moment savijanja određuje se prema (4.97), s tim da se mjesto l postavi razmak među umecima između vodiča (l_1), dok se naprezanje σ_1 zbog djelovanja struja u sastavljenoj sabirnici određuje prema (4.107). Sabirnicu treba dimenzionirati da bude ispunjen uvjet

$$\sigma + \sigma_1 \leqq 2\,\sigma_{0,2} \qquad \ldots (4.111)$$

gdje je σ naprezanje radi struja u ostalim fazama, a σ_1 radi međusobnih djelovanja struja iste faze.

e) Vlastita frekvencija sabirnica

Iako utjecaj vlastite frekvencije sabirnica nije od većeg značenja za dimenzioniranje sabirnica, potrebno je moći odrediti vlastitu frekvenciju, jer ona može — kako ćemo vidjeti u 4.1E — znatno utjecati na izbor potpornih izolatora.

Osnovnu vlastitu frekvenciju sabirnice (postoje naime i više vlastite frekvencije) možemo odrediti (Lit. 37) iz izraza

$$c_1 = \frac{s_1^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{E\,J}{\varrho q}}\ \mathrm{s}^{-1} \qquad \ldots (4.112)$$

gdje su: l duljina sabirnice u m između dva potporna izolatora, E modul elastičnosti u N/m² materijala sabirnica, J moment tromosti u m⁴ presjeka sabirnice s obzirom na os koja je okomita na smjer sile, ϱ gustoća (masa po jedinici volumena) u kg/m³ materijala sabirnica, a q površina presjeka sabirnica u m². Veličina s_1 ovisi o načinu pričvršćenja sabirnica; za ukliješteni je nosač $s_1 = 4{,}73$, za nosač ukliješten samo na jednoj strani $s_1 = 3{,}927$, a za nosač sa pomičnim osloncima na oba kraja $s_1 = 3{,}141$. Modul elastičnosti je za

bakar $E = 12{,}0 \cdot 10^{10}$ N/m²
aluminij $E = 6{,}5 \cdot 10^{10}$ N/m²

dok je gustoća za

bakar $\varrho = 8{,}9 \cdot 10^3$ kg/m³
aluminij $\varrho = 2{,}7 \cdot 10^3$ kg/m³

Uvrštavanjem konstanata ovisnih o materijalu, i veličina ovisnih o presjeku u (4.112), dobivamo za plosnate profile, ako sila djeluje paralelno sa stranicom b (sl. 4.28), za

$$\text{bakar} \quad c_1 = 3610\,\frac{b}{l^2}\ \mathrm{s}^{-1} \qquad \ldots (4.113a)$$

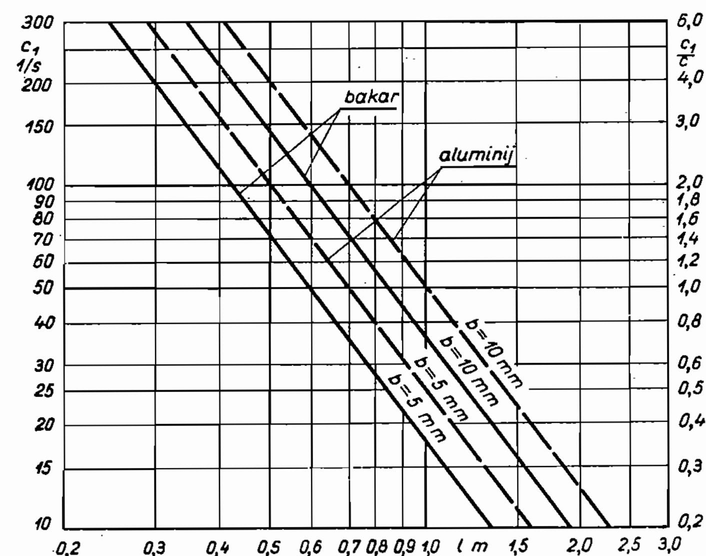
$$\text{aluminij} \quad c_1 = 5060\,\frac{b}{l^2}\ \mathrm{s}^{-1} \qquad \ldots (4.113b)$$

dok za pune okrugle sabirnice imamo za

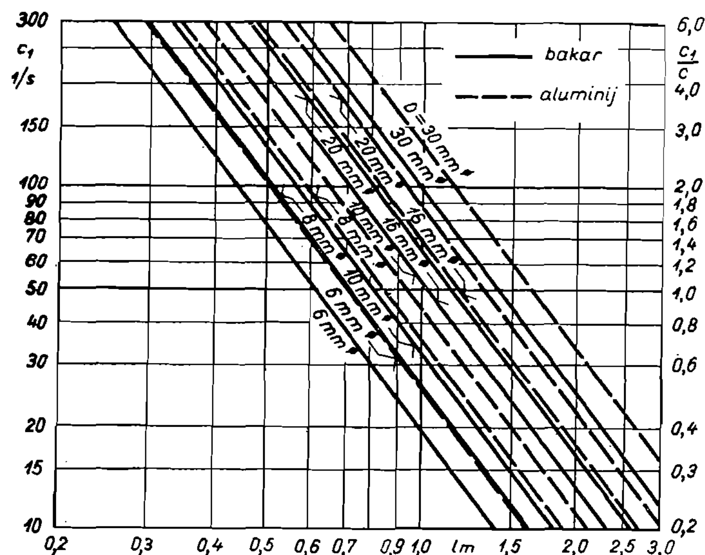
$$\text{bakar} \quad c_1 = 3270\,\frac{D}{l^2}\ \mathrm{s}^{-1} \qquad \ldots (4.114a)$$

$$\text{aluminij} \quad c_1 = 4370\,\frac{D}{l^2}\ \mathrm{s}^{-1} \qquad \ldots (4.114b)$$

Na sl. 4.36. i 4.37. prikazana je ovisnost vlastite frekvencije sabirnica o duljini sabirnica između dva potporna izolatora za najčešće upotrebljavane širine, odnosno promjere vodiča.



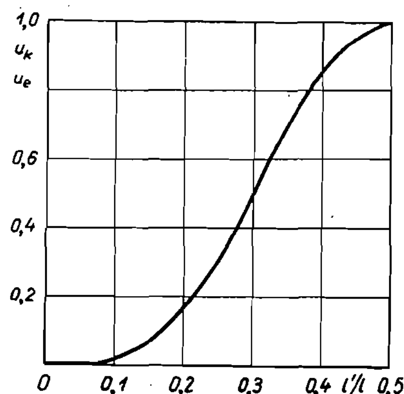
Slika 4.36. Vlastita frekvencija (c_1) sabirnica pravokutnog presjeka; (b) širina sabirnice u smjeru djelovanja sile, (l) duljina sabirnice između dva potporna izolatora, (c) frekvencija mreže



Slika 4.37. Vlastita ferkvencija (c_1) okruglih sabirnica; (D) promjer sabirnica, (l) duljina sabirnica između dva potporna izolatora, (c) frekvencija mreže

Vlastita frekvencija sabirnica prema (4.112) ne uzima u obzir otcjepe za priključak aparata na sabirnice. Postojanje tih otcjepa utječe na vlastitu frekvenciju sabirnice. Prema (Lit. 35) koeficijent promjene vlastite frekvencije nastale radi postojanja otcjepa određuje se formulom

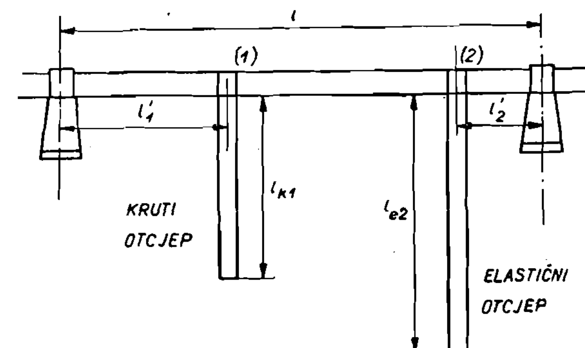
$$\varkappa_1 = \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{64}\sum \frac{I_k}{I}\left(\frac{l'}{l_k}\right)^2 u_k + \frac{1}{16}\sum \frac{I_e}{I}\left(\frac{l'}{l_e}\right)^2 u_e}{1 + 0{,}6 \sum \frac{q_k}{q}\,\frac{l_k}{l'}\, u_k + \sum \frac{q_e}{q}\,\frac{l_e}{l'}\, u_e}} \qquad \ldots (4.114)$$



Slika 4.38. Ovisnost faktora nesimetrije (u) o omjeru l'/l. (l') udaljenost spoja otcjepa na sabirnice od bližeg potpornog izolatora, (l) razmak među potpornim izolatorima sabirnica

U toj formuli indeks k označava krute, a indeks e elastične otcjepe. Krutim otcjepom smatramo onaj, koji ispunja jedan od dva slijedeća uvjeta: a) moment tromosti presjeka otcjepa približno je jednak momentu tromosti presjeka sabirnice, a duljina je otcjepa jednaka ili manja od 60% duljine sabirnice između dva potporna izolatora; b) moment tromosti presjeka otcjepa manji je od momenta tromosti presjeka sabirnice, a duljina otcjepa jednaka je ili manja od 30% duljine sabirnice između dva potporna izolatora. U (4.114) su I_k i I_e momenti tromosti presjeka otcjepa, I je moment tromosti presjeka sabirnica, l_k i l_e duljine otcjepa, l' udaljenost spoja otcjepa na sabirnicu od bližeg potpornog izolatora, q_k i q_e su površine presjeka otcjepa, dok je q površina presjeka sabirnice. Veličine u_k i u_e definirane su nesimetričnošću spoja otcjepa i ovisne su o omjeru udaljenosti (l') spoja odcjepa na sabirnicu od bližeg potpornog izolatora i duljini sabirnice (l) između dva potporna izolatora. Ovisnost u_k odnosno u_e o l'/l prikazana je na sl. 4.38.

Na sl. 4.39 prikazan je primjer sa dva otcjepa, s oznakama upotrebljenim u (4.114).



Slika 4.39. Primjer dijela sabirnica sa dva otcjepa

Faktor $\varkappa_1$ određen je uz pretpostavku da se otcjepi nalaze u ravnini sabirnica, pa ako taj uvjet nije ispunjen treba izvršiti daljnju korekturu, uzimajući u obzir kut δ (sl. 4.40) koji otcjep zatvara s ravninom sabirnice. Utjecaj takvog položaja otcjepa uzima se u obzir faktorom $\varkappa_2$, koji se određuje iz relacije (Lit. 36. i 24)

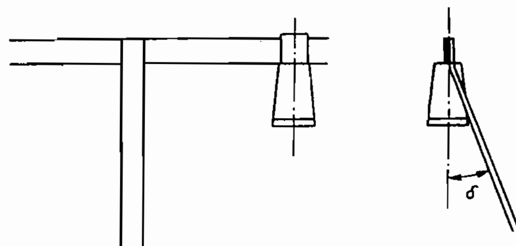
$$\varkappa_2 = 1 + \left[\left(\frac{l}{l - l'}\right)^2 \frac{\varkappa_1'}{\varkappa_1} - 1\right] \sin\delta \qquad \ldots (4.115)$$

gdje su l i l' duljine definirane na sl. 4.39, δ kut prikazan na sl. 4.40, $\varkappa_1$ veličina prema (4.114), uzimajući u obzir sve otcjepe na promatranom dijelu sabirnica između dva potporna izolatora, dok je $\varkappa_1'$ veličina prema (4.114), ali za otcjepe koji se nalaze na dijelu sabirnica duljine $l - l'$.

Poznavajući $\varkappa_1$ i $\varkappa_2$ korigiranu vlastitu frekvenciju sabirnica, određujemo

$$c_1' = c_1 \varkappa_1 \varkappa_2$$

Za sabirnicu sastavljenu od dva i više vodiča s umecima treba uvesti daljnji korekcioni faktor ($\varkappa_3$), koji uzima u obzir broj (n) vodiča od kojih je sastavljena sabirnica, te broj (z) umetaka među vodičima. Na temelju



Slika 4.40. Primjer otcjepa koji se ne nalazi u istoj ravnini s ravninom sabirnice

eksperimentalnih ispitivanja (Lit. 35) može se utvrditi da postoji ovisnost između faktora $\varkappa_3$ i omjera mase umetka i mase sabirnice između dva potporna izolatora, a taj omjer može se odrediti iz relacije

$$\gamma = \frac{G_u}{n \varrho q l} \qquad \ldots (4.115a)$$

gdje su: G_u masa (kg) jednog umetka (uključujući i vijke kojima je umetak spojen s vodičima), n broj vodiča jedne sabirnice, ϱ (kg/m^3) specifična masa sabirnice, q (m^2) presjek vodiča sabirnice, a l (m) razmak između dva potporna izolatora. Vlastitu frekvenciju sastavljene sabirnice, ako nema otcjepa, određujemo iz relacije

$$c_1'' = c_1 \varkappa_3 \qquad \ldots (115b)$$

gdje je c_1 vlastita frekvencija jednog od vodiča, od kojih je sastavljena sabirnica prema (4.112). Korekcioni faktor $\varkappa_3$ određuje se iz dijagrama na sl. 4.41. (Lit. 24), dok je razmještaj umetaka prikazan na sl. 4.42.

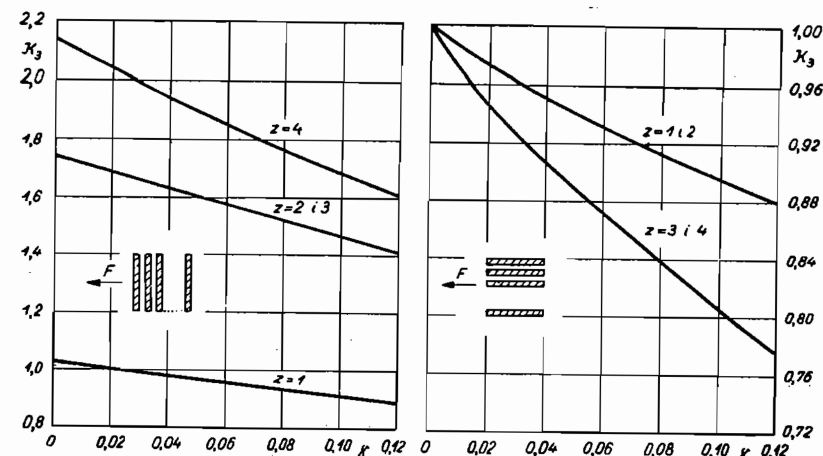
Naravno da i za sastavljene sabirnice treba uzeti u obzir otcjepe, pa je tada vlastita frekvencija

$$c_1'' = c_1 \varkappa_1 \varkappa_2 \varkappa_3 \qquad \ldots (4.115c)$$

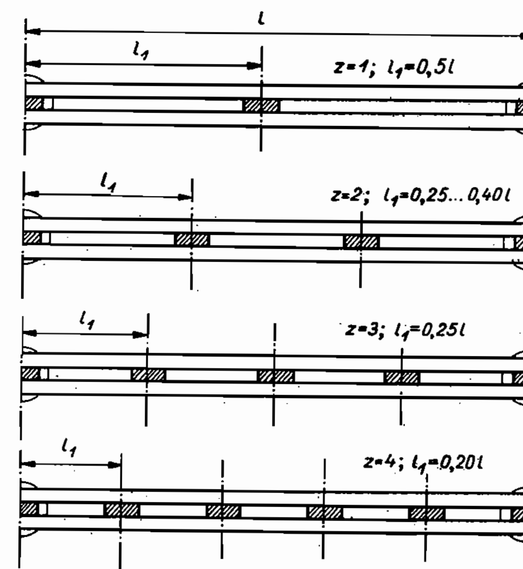
Tada u (4.114) I znači moment tromosti cijele sabirnice, a q presjek svih vodiča od kojih je ona sastavljena. Korekcioni faktor $\varkappa_2$ određuje se sada iz relacije

$$\varkappa_2 = 1 + \left[\left(\frac{l}{l - l'}\right)^2 \frac{\varkappa_1'}{\varkappa_1} \frac{\varkappa_3'}{\varkappa_3} - 1\right] \sin \delta \qquad \ldots (4.115d)$$

gdje se $\varkappa_3$ odnosi na cijelu duljinu sabirnice između dva potporna izolatora, dok je $\varkappa_3'$ korekcioni faktor za duljinu $l - l'$ (sl. 4.39).



Slika 4.41. Ovisnost korekcionog faktora $\varkappa_3$ za različiti broj umetaka z o γ (4.115a)

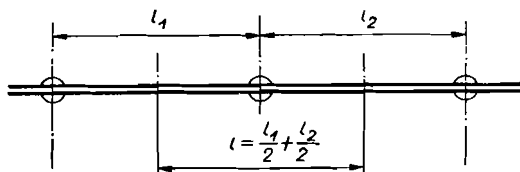


Slika 4.42. Razmještaj umetaka među vodičima sabirnice

E. Potporni izolatori

a) Općenito o potpornim izolatorima

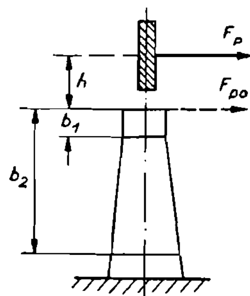
Potporni izolatori nose sabirnice i ostale neizolirane vodiče u rasklopnom postrojenju. Potporni izolator izolira goli vodič od uzemljenih dijelova i preuzima na sebe sile koje djeluju na sabirnice. Radi toga potporne izolatore treba odabrati prema nazivnom naponu sabirnice i prema veličini sile koja se prenosi na njih.



Slika 4.43. Duljina sabirnice l mjerodavna za određivanje sile na potporni izolator

U odsječku D ovog poglavlja određena je sila f po jedinici duljine sabirnice, pa množenjem s duljinom l (sl. 4.43) dobivamo silu

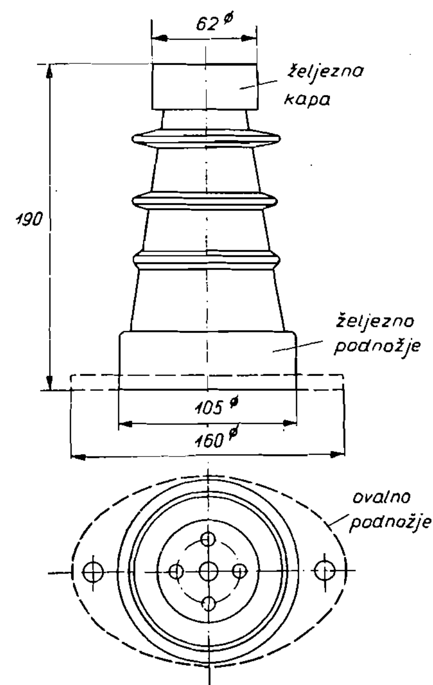
$$F_p = f\,l \qquad \dots (4.115e)$$



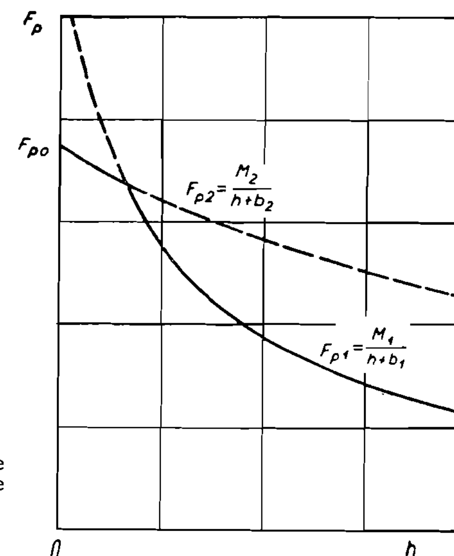
Slika 4.44. Hvatište i krakovi sile, koja djeluje na potporni izolator

za koju možemo smatrati da ima hvatište u polovini visine sabirnice (sl. 4.44). Pri izboru potpornih izolatora mjerodavna je sila F_p, koja djeluje na najviše opterećeni izolator.

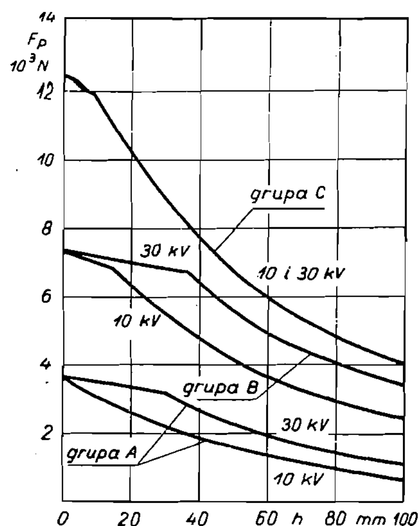
S obzirom na izvedbu i mehaničku čvrstoću, razlikujemo dva tipa izolatora: porculanski, i onaj od umjetnih smola (araldit i sl.). Prema DIN normama (njemačke industrijske norme) porculanski izolator ima kapu i podnožje od ljevenog željeza (sl. 4.45). Porculanski izolator nema istu čvrstoću po cijeloj visini. Do pucanja može doći neposredno ispod kape (krak sile $h + b_1$ sl. 4.44) ili neposredno iznad podnožja (krak sile $h + b_2$). Dopušteni moment savijanja M_1 za presjek neposredno ispod kape manji je (radi manje površine presjeka) nego dopušteni momenat savijanja M_2



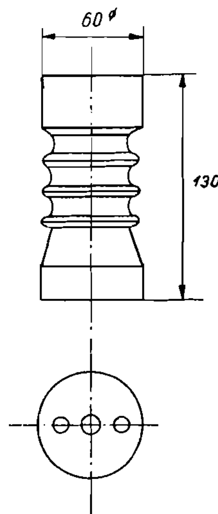
Slika 4.45. Porculanski potporni izolator (označene dimenzije za izolator 10 kV)



Slika 4.46. Određivanje dozvoljene sile s hvatištem u polovini visine sabirnice za porculanski izolator



Slika 4.47. Dozvoljena sila s hvatištem u polovini visine sabirnice za porculanske izolatore prema DIN normama



Slika 4.48. Rebrasti potporni izolator od araldita (označene dimenzije za izolator 10 kV)

za presjek neposredno iznad podnožja. Dopušteno mehaničko naprezanje potpornih izolatora definirano je silom F_{po}, pa razlikujemo

grupu A $F_{po} =$ 3679 N (375 kp)

grupu B $F_{po} =$ 7358 N (750 kp)

grupu C $F_{po} =$ 12273 N (1250 kp)

Poznajemo li dopuštene momente savijanja M_1 i M_2 možemo odrediti maksimalnu dopuštenu silu F_p s obzirom na presjek neposredno ispod kape, odnosno s obzirom na presjek neposredno iznad podnožja. Maksimalno dopuštene sile iznose

$$F_{p1} = \frac{M_1}{h + b_1} \qquad \dots (4.115f)$$

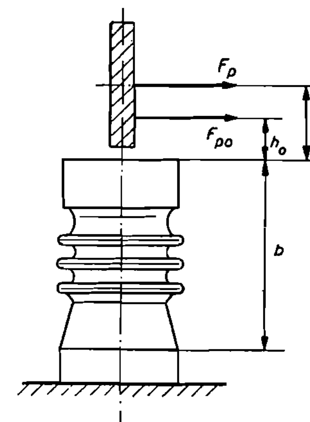
$$F_{p2} = \frac{M_2}{h + b_2} \qquad \dots (4.115g)$$

Dopuštena je ona sila (F_{p1} ili F_{p2}) koja je manja. Za $h = 0$ manja je F_{p2}, dok je za veće visine sabirnica manja F_{p1}. Prema tome je $M_2 = F_{po}\, b_2$. Na sl. 4.46. prikazan je primjer ovisnosti F_p od h, te dopuštena sila na sabirnicu. Na sl. 4.47. prikazana je ovisnost dopuštene sile F_p o visini (h) hvatišta sile iznad gornjeg ruba kape za potporne porculanske izolatore izvedene prema DIN-normama.

Rebrasti izolatori od umjetnih smola (sl. 4.48) nemaju ni metalne kape ni podnožja, a konstrukcija im je takva da su iste čvrstoće i u gornjem i u donjem dijelu. Za rebraste izolatore grupe su definirane silom F_{po}, koja djeluje h_o iznad gornjeg ruba izolatora. Tako je npr. za grupu A (sila $F_{po} = 3679$ N, odnosno 375 kp) krak h_o jednak 30 mm. Ako sa b označimo razmak između gornjeg ruba i najopterećenijeg presjeka pri dnu izolatora (sl. 4.49), dopuštenu silu na polovini visine sabirnice određujemo iz izraza

$$F_p = F_{po}\frac{h_o + b}{h + b} \qquad \dots (4.115h)$$

gdje je h udaljenost hvatišta sile F_p od gornjeg ruba izolatora (sl. 4.49). Pri maloj visini h ($h < h_o$) sila F_p može biti i veća od F_{po}.



Slika 4.49. Hvatište i krakovi sile, koja djeluje na rebrasti potporni izolator

Preporučuje se, međutim, da se radi sigurnosti dopuštena sila F_p uzme za 30% manja od one dobivene iz dijagrama na sl. 4.47, odnosno iz formule (4.115h).

U nekim slučajevima radi velikih sila nije moguće izaći ni s potpornim izolatorom grupe C, pa se tada postavljaju po dva potporna izolatora u svaku potpornu tačku.

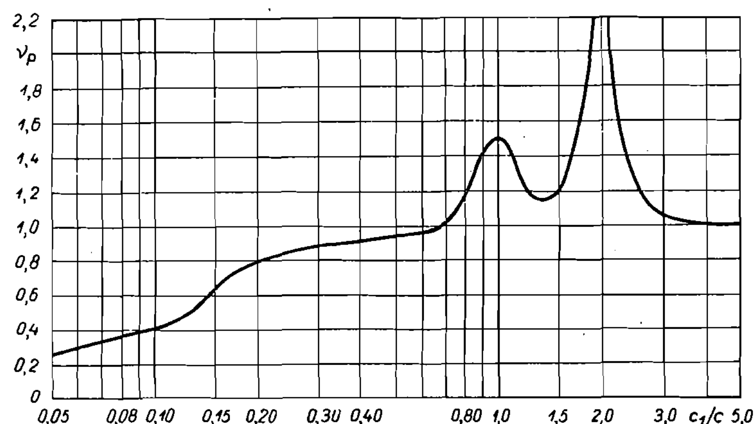
b) Utjecaj titranja na naprezanje potpornih izolatora

Ako sa F_p' označimo silu koja djeluje u hvatištu, ali ne uzimajući u obzir utjecaj titranja, te ako je pomnožimo s frekventnim faktorom ν_p, dobit ćemo silu F_p s kojom treba provesti daljnji račun, kako je već opisano u prethodnom odsječku. Dakle

$$F_p = \nu_p F_p' \qquad \dots (4.115k)$$

Frekventni faktor ν_p u ovisnosti o relativnoj frekvenciji c_1/c prikazan je na sl. 4.50. Treba naglasiti da se i sada radi o vlastitoj frekvenciji sabirnice, koja se određuje na već opisani način. I ovdje treba uzeti u obzir naprezanje sabirnice, jer frekventni faktor na sl. 4.50. vrijedi samo onda kad je

$$\sigma + \sigma_1 < 0{,}8\, \sigma_{0,2}' \qquad \dots (4.115l)$$



Slika 4.50. Ovisnost frekventnog faktora potpornog izolatora (ν_p) o omjeru vlastite frekvencije sabirnice (c_1) i frekvencije mreže (c)

gdje su: σ naprezanje sabirnice radi djelovanja struja u ostalim fazama, σ_1 naprezanje krajnjeg vodiča radi struje u ostalim vodičima iste faze (σ_1 dolazi u obzir samo pri sastavljenoj sabirnici), a $\sigma_{0,2}'$ najveća granica tečenja materijala sabirnice (tab. 4.8). Kad je, naime, ispunjena nejednadžba (4.1151) sabirnica se, kako je spomenuto, vlada kao elastični nosač. Ako je, međutim, naprezanje sabirnice

$$0{,}8\sigma_{0,2}' \leqq \sigma + \sigma_1 \leqq 2\sigma_{0,2} \qquad \ldots (4.116)$$

treba računati sa $\nu_p = 1$, jer se u tom slučaju sabirnica više ne vlada kao elastična greda, kako je to spomenuto u odsječku o naprezanju sabirnice.

TABLICA 4.9.

Izolatorski lanci za rasklopna postrojenja

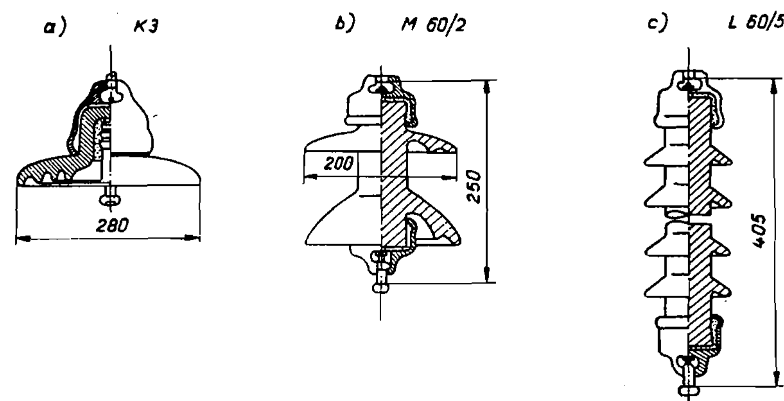
Nazivni napon kV	Kapasti izolatori		Masivni izolatori	Štapni izolatori
	viseći lanac	rasteretni lanac		
60	4 × K 170/280	5 × K 170/280	3 × M 60/2 ili 2 × M 75/2	1 × L 75/9
110	7 × K 170/280	8 × K 170/280	4 × M 75/2 ili 4 × M 85/2	1 × L 75/14 ili 1 × L 85/14
220	14 × K 170/280	14 × K 170/280	7 × M 75/2 ili 7 × M 85/2	2 × L 85/14

Oznake prema DIN-normama:
kapasti izolatori K, masivni izolatori VK, štapni izolatori VKL

Da se izbjegne određivanje vlastite frekvencije sabirnica, može se postaviti da je frekventni faktor

$$\nu_p' = \frac{0{,}8\,\sigma_{0,2}'}{\sigma + \sigma_1} > 1 \qquad \ldots (4.117)$$

Tako određeni frekventni faktor ima najveću moguću vrijednost, jer je pri $\sigma + \sigma_1 \doteq 0{,}8\,\sigma_{0,2}'$ frekventni faktor jednak 1. Naravno da ν_p' ima samo teoretsko značenje, jer tada izabiremo potporni izolator kao da je na sabirnici postignuto maksimalno naprezanje do kojega sabirnicu još možemo smatrati elastičnim nosačem. Radi toga je pogodno prvu kontrolu izvršiti s frekventnim faktorom ν_p' pa ako se ustanovi da se i pored tako visokog frekventnog faktora može izići s mehanički najslabijim potpornim izolatorom, nije ni potrebno određivati vlastitu frekvenciju sabirnica i frekventni faktor prema sl. 4.50. Ako spomenuti uvjet nije ispunjen, potrebno je, naravno, račun provesti s frekventnim faktorom prema sl. 4.50.



Slika 4.51 Tipovi visećih izolatora: (a) kapasti, (b) masivni i (c) štapni izolatori

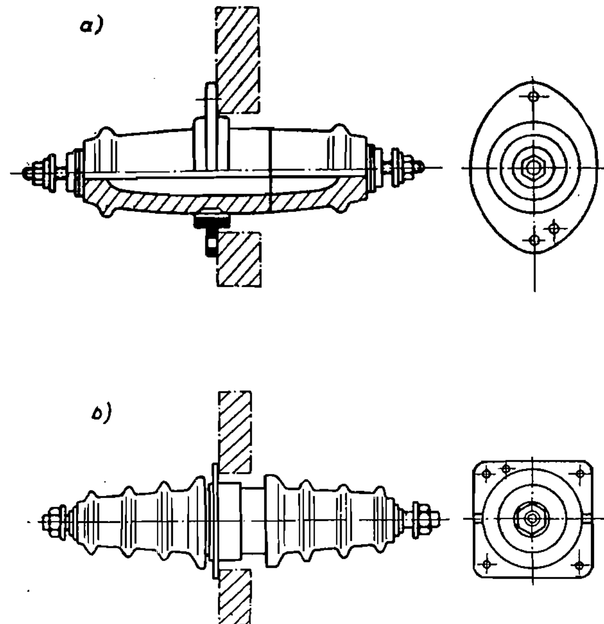
c) Viseći izolatori kao nosači sabirnica

U rasklopnim postrojenjima u kojima su sabirnice izvedene od užeta, kao nosači sabirnica upotrebljavaju se viseći izolatori. Dolaze u obzir izolatori u obliku kape — kapasti (sl. 4.51a), masivni (4.51b) i štapni (4.51c) izolatori. U tab. 4.9. naveden je broj članaka za pojedine nazivne napone. Dimenzije pojedinih tipova visećih izolatora mogu se naći u priručnicima (Lit. 40). Za rasteretne, a često i za nosive lance, preporučljivo je upotrijebiti dvostruke lance, jer je u rasklopnim postrojenjima veća vjerojatnost pojave luka nego na vodovima, i jer pad sabirnica može izazvati znatna oštećenja u rasklopnom postrojenju.

F. Provodni izolatori

Provodni izolatori imaju zadatak da izoliraju gole vodiče od zida ili metalnih dijelova. Upotrebljavaju se pri prolazu vodiča iz prostorije u prostoriju, iz jednog dijela oklopljenog rasklopnog postrojenja u drugi, ili iz rasklopnog postrojenja u slobodan prostor.

Među provodnim izolatorima razlikujemo dva tipa: oni unutar prostorija (sl. 4.52a i 4,53a) i oni koji se barem jednom polovinom nalaze na otvorenom (sl. 4.52b i 4.53b). Osim toga razlikujemo provodne izolatore za okrugle vodiče (sl. 4.52) i za plosnate vodiče (sl. 4.53).

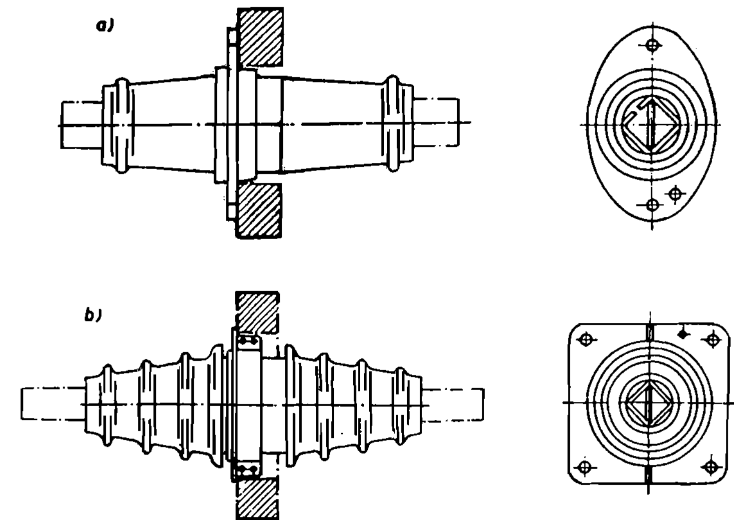


Slika 4.52. Provodni izolator za okrugle vodiče

Izbor provodnih izolatora vrši se prema nominalnom naponu i prema maksimalnoj trajnoj struji u normalnom pogonu, dok se kontrola izabranog tipa vrši s obzirom na mehaničko naprezanje i ugrijavanje u slučaju kratkog spoja. Pri izboru provodnih izolatora potrebno je uzeti u obzir i veličinu struje radi ugrijavanja vodiča u provodnom izolatoru.

Provodni izolatori za okrugle vodiče proizvode se normalno za 200, 400, 600, 1000, 1500 i 2000 A, što odgovara maksimalnoj trajnoj struji u normalnom pogonu. Kontrola s obzirom na ugrijavanje za vrijeme kratkog spoja vrši se na isti način kao i za sabirnice. Za veće struje upotrebljavaju se provodni izolatori s vodičima plosnatog profila. Takav provodni izolator

pogodno je upotrijebiti i za manje struje, kad su u ostalom postrojenju upotrebljeni plosnati vodiči.

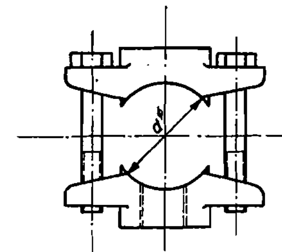


Slika 4.53. Provodni izolatori za plosnate vodiče

Radi velikog kraka sile na provodni izolator proizvodi se samo grupa B (sila F_{po} =7358 N ili 750 kp) i grupa C (sila F_{po} = 12273 N ili 1250 kp). Određivanje dopuštene sile vrši se prema istim principima kao za potporni izolator.

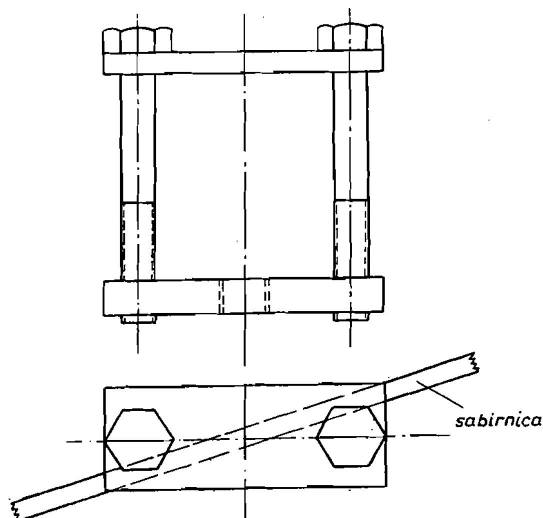
G. Nosači sabirnica

Postoji niz izvedaba nosača sabirnica. Treba razlikovati nosače za okrugle i za plosnate sabirnice. Na sl. 4.54. prikazan je nosač za okruglu sabirnicu, a na sl. 4.55. za plosnatu. Prikazana izvedba nosača za plosnatu

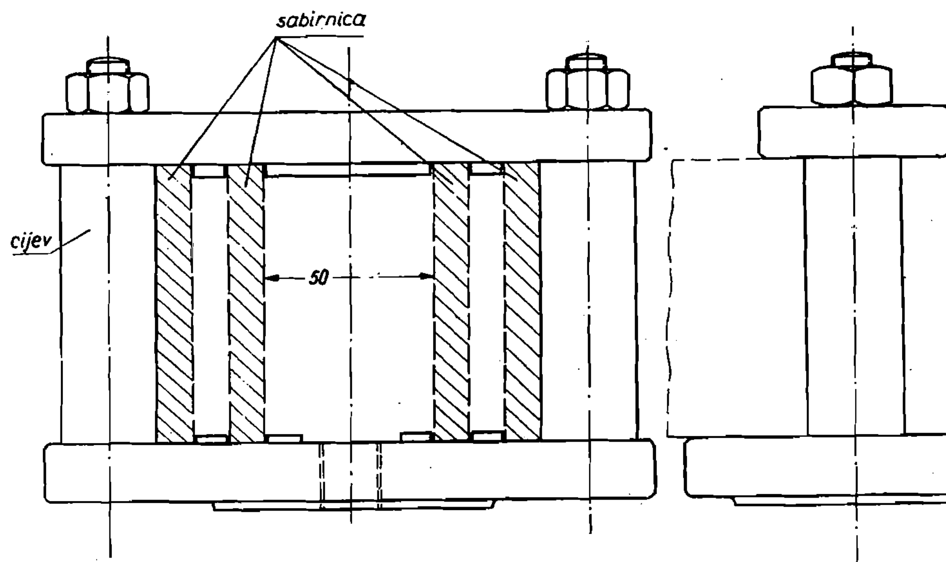


Slika 4.54. Nosač okrugle sabirnice

sabirnicu postavlja se koso na sabirnicu, da se ona uklliješti među dva vijka. Za sabirnicu sastavljenu od više vodiča može se upotrijebiti nosač prikazan na sl. 4.56.



Slika 4.55. Nosač za plosnatu sabirnicu (s oznakom položaja sabirnice)

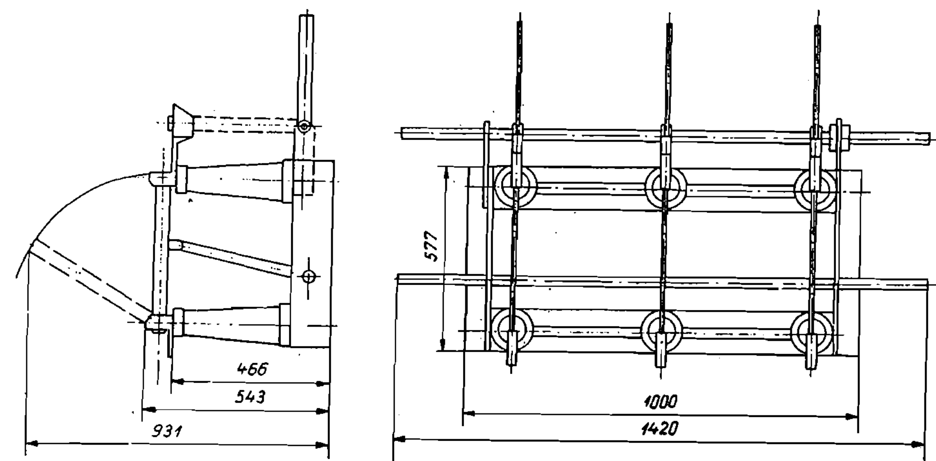


Slika 4.56. Nosač za sabirnicu sastavljenu od četiri vodiča

4.2. RASTAVLJAČI

A. Upotreba i izbor

Rastavljači (sl. 4.57) služe za to da vidljivo odvoje dio rasklopnog postrojenja koje nije pod naponom, od dijela koji je pod naponom. Njihov je, dakle, primarni zadatak da povećaju sigurnost osoblja koje treba da radi na dijelu rasklopnog postrojenja, pri čemu naročito naglašavamo da položaj noževa rastavljača mora biti vidljiv.



Slika 4.57. Izvedba rastavljača za napon 35 kV

Izbor rastavljača vrši se prema nazivnom naponu, maksimalnoj struji u normalnom pogonu, uz kontrolu s obzirom na udarnu struju kratkog spoja (mehanička čvrstoća) i s obzirom na struju kratkog spoja mjerodavnu za ugrijavanje (dopušteno povišenje temperature).

Maksimalna struja kroz rastavljač u normalnom pogonu mjerodavna je za izbor rastavljača prema nazivnoj struji (nazivna struja je tolika struja koja može trajno teći kroz rastavljač, a da temperatura vodiča ne prekorači dopuštenu granicu). Obično se proizvodi ograničen broj tipova rastavljača s obzirom na nazivnu struju. Broj tipova je normalno to manji, što je viši nazivni napon, jer su za visoki nazivni napon troškovi za kontakte i vodljive dijelove maleni u usporedbi s troškovima za izolatore i postolje. Zato se npr. za napon 110 kV proizvodi obično samo jedan tip rastavljača i to za najveću nazivnu struju koja praktički može doći u obzir. U tab. 4.10. navedene su nazivne struje za koje se najčešće izvode rastavljači.

Nakon što je odabran rastavljač prema nazivnoj struji, potrebno je izabrani rastavljač kontrolirati s obzirom na mehanička naprezanja i ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkog spoja. Mehaničko naprezanje određeno je udarnom strujom, a izdržljivost rastavljača ovisna je o njegovoj konstrukciji. Tvornice koje proizvode rastavljače navode podatke o udarnoj struji (tjemena vrijednost) i o struji mjerodavnoj za ugrijavanje, koju može

rastavljač izdržati 1 sekundu. U tab. 4.11. navedeni su radi primjera podaci o tim dvjema strujama prema njemačkim DIN-normama. Ako kratki spoj traje dulje od 1 sekunde, dopuštena struja određuje se izrazom

$$I_t = \frac{I_{t1}}{\sqrt{t}} \qquad \ldots (4.118)$$

gdje su I_{t1} dopuštena struja kroz 1 s, a t trajanje kratkog spoja u sekundama. Relacija (4.118) izlazi iz uvjeta jednakosti razvijenih toplina za različita trajanja kratkog spoja.

TABLICA 4.10.

Izvedbe rastavljača prema nazivnoj struji

10	35	110	220	kV
200	—	—	—	A
400	400	—	—	A
600	600	600	600	A
1000	1000	—	—	A
2000	2000	—	—	A
3000	—	—	—	A
4000	—	—	—	A
6000	—	—	—	A

TABLICA 4.11.

Dopuštena udarna struja i dopuštena mjerodavna struja za ugrijavanje (efektivna vrijednosti struje kratkog spoja) **kroz 1 sekundu, u ovisnosti o nazivnoj struji rastavljača**

Nazivna struja rastavljača	Dopuštena udarna struja	Dopuštena struja kroz 1 s
A	kA	kA
200	25	15
400	35	21
600	50	30
1000	100 (150)*	60 (75)*
2000—6000	150	75

* Pojačana izvedba

Ako se kontrolom ustanovi da rastavljač odabran prema maksimalnoj struji u normalnom pogonu ne može da izdrži bilo mehanička naprezanja bilo ugrijavanje za vrijeme kratkog spoja, odabire se rastavljač veće nazivne struje, da bi se spriječilo njegovo oštećenje u slučaju kratkog spoja.

Rastavljač se normalno ne upotrebljava za prekidanje struje, već se isklapanje vrši kada kroz rastavljač ne teče struja. Otvaranjem kontakata rastavljača pojavit će se luk među kontaktima, posljedica čega mogu biti znatna oštećenja u rasklopnom postrojenju. Rastavljač nema, naime, ni uređaja ni medija za gašenje luka. Kad se, međutim, radi o malim strujama, može se upotrijebiti i rastavljač za njihovo prekidanje. Pri tome je važno da se isklapanje izvrši što je moguće brže. Tako je (tab. 4.12)

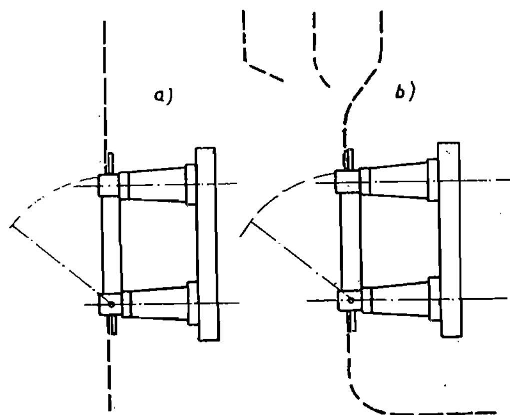
TABLICA 4.12.

Mogućnost prekidanja struje pomoću rastavljača montiranog okomito, uz brzo isklapanje (Lit. 58)

Transformator u praznom hodu				
Nazivni napon kV	6	10	20	30
Nazivna snaga transformatora kVA	400	315	250	250
Najveća struja praznog hoda A	6	3	1,25	1,0
Opterećeni transformator				
Nazivni napon kV	6	10	20	30
Opterećenje transformatora kVA	75	50	50	50
Nazivna struja transformatora A	7	3	1,5	1,0

rastavljačem moguće prekinuti struju praznog hoda transformatora nazivne snage od nekoliko stotina kVA, kao i struju opterećenog transformatora od nekoliko desetaka kVA. Rastavljačem je moguće prekinuti i kapacitivnu struju (prazan hod) zračnog voda duljine do oko 20 km i napona do 10 kV. Međutim tvornice koje proizvode rastavljače ne garantiraju obično ni toliku sposobnost rastavljača za prekidanje struje. Treba naglasiti da je za mogućnost isklapanja transformatora u praznom hodu mjerodavna veličina struje magnetiziranja. Struja magnetiziranja može za manje transformatore, do 250 kVA, iznositi 3% do 12%, a za veće, od 250 kVA do 1600 kVA, od 2% do 10% nazivne struje. Radi toga je neophodno poznavati veličinu struje magnetiziranja prilikom donošenja odluke o isklapanju transformatora u praznom hodu. Pri isklapanju potrebno je osim toga voditi računa o naponu na stezaljkama transformatora, jer s povišenjem napona raste i struja magnetiziranja. Podaci o mogućnostima isklapanja pomoću rastavljača vrijede samo za rastavljače koji su montirani tako da noževi u uklopljenom stanju stoje okomito, jer se tada postiže najpovoljniji uzgon luka. Naročitu pažnju prilikom prekidanja struje rastavljačem treba obratiti na pogon za otvaranje kontakata, jer mora biti osigurano brzo otvaranje, što nije uvijek slučaj ako se radi o pogonu s polugama. Prekidanje struje ne smije se vršiti rastavljačima koji nemaju istodobno otvaranje kontakata svih triju faza.

Jedan je od uvjeta dobrog funkcioniranja rastavljača da se ne otvori u slučaju kratkog spoja. To se postiže njegovom ispravnom konstrukcijom (Lit. 56. i 58) i izbjegavanjem nepovoljnog priključka spojnih vodova koji bi mogli prouzrokovati otvaranje rastavljača. Na sl. 4.58a prikazan je



Slika 4.58. Povoljni (a) i nepovoljni (b) priključak na rastavljač s obzirom na silu koja djeluje na otvaranje rastavljača

povoljni, a na sl. 4.58b nepovoljni smještaj priključnih vodova. Sila na nož rastavljača je to veća, što je udaljenost od vodiča manja i što je struja kratkog spoja veća.

U nekim slučajevima upotrebljavaju se rastavljači koji osim glavnih noževa imaju i noževe za uzemljenje koji služe za uzemljenje zračnog voda ili kabela nakon isklapanja (sl. 4.57). Obično su glavni noževi i noževi za uzemljenje međusobno tako mehanički povezani, da se oni za uzemljenje ne mogu uklopiti kad je rastavljač zatvoren, odnosno da se glavni noževi ne mogu uklopiti kada su uklopljeni noževi za uzemljenje.

B. Izvedbe

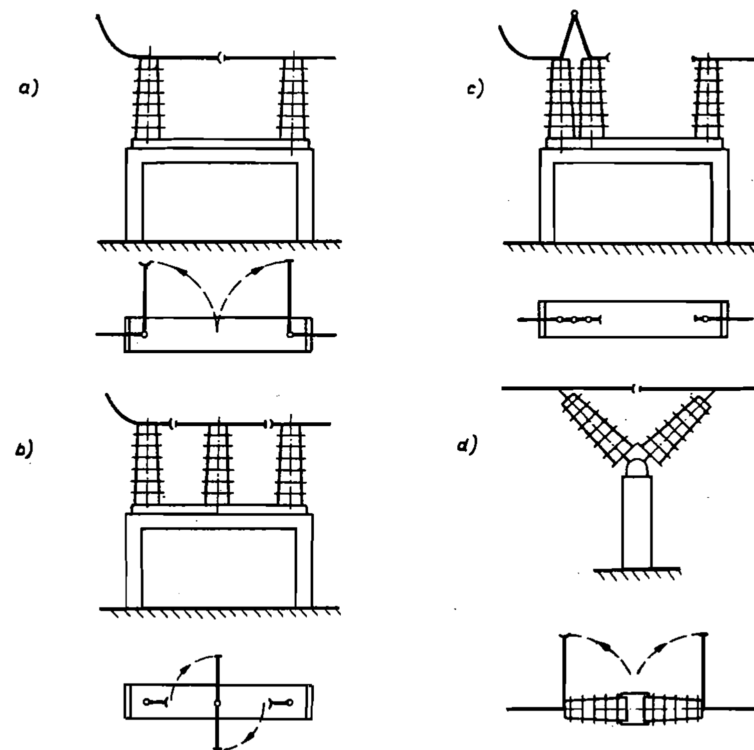
Za napone do uključivo 35 kV upotrebljavaju se rastavljači izvedeni, u principu, kao rastavljač na sl. 4.57.

Za više napone postoji niz konstrukcija koje omogućuju različite izvedbe rasklopnih postrojenja. Glavna je težnja da se konstruira s malom tlocrtnom površinom kako u otvorenom, tako i u zatvorenom položaju. Na sl. 4.59. prikazani su rastavljači sa dva i tri izolatora, a na sl. 4.60. s jednim izolatorom. Rastavljač u kojega se srednji izolator pomiče između dva krajnja izolatora (sl. 4.59c) treba manji razmak među rastavljačima različitih faza, jer mu kontakti ne izlaze iz njegove ravnine, što je slučaj

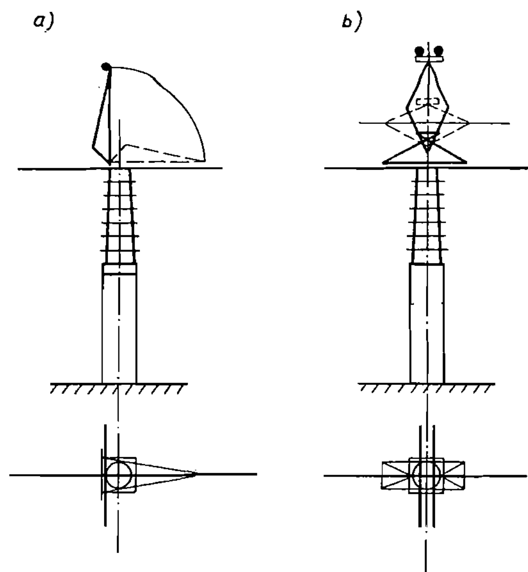
u ostalih izvedaba prikazanih na sl. 4.59. Najmanju površinu trebaju rastavljači s jednim izolatorom (sl. 4.60), čija je izvedba kompliciranija.

Normalno su rastavljači svih triju faza tako mehanički spojeni, da se uklapanje i isklapanje vrši istovremeno za sve faze. Iznimno se za napone do 10 kV izvode rastavljači s ušicama na noževima, koji se isklapaju i uklapaju pomoću izolirane motke i to svaki pol posebno. Takvi rastavljači upotrebljavaju se samo u najmanjim rasklopnim postrojenjima.

Upravljanje rastavljačem ručno je ili pneumatsko. Ručno upravljanje vrši se preko poluga vezanih s osovinom rastavljača. Za pneumatski pogon potreban je komprimirani zrak, koji djelovanjem na stap u cilindru pokreće osovinu rastavljača. Pneumatskim pogonom može se upravljati i iz komandne prostorije, dok je pri upravljanju ručnim pogonom potrebno doći do ćelije ili polja gdje se nalazi rastavljač. U nekim slučajevima rastavljačima se upravlja i motornim pogonom, što se također može obavljati iz daljine. Pri motornom pogonu motor istosmjerne struje zakreće osovinu rastavljača.



Slika 4.59. Izvedba rastavljača za napone iznad 35 kV sa dva ili tri izolatora



Slika 4.60. Izvedbe rastavljača za napone iznad 35 kV s jednim izolatorom

4.3. UREĐAJI ZA PREKIDANJE STRUJE

A. Općenito

U visokonaponskim postrojenjima za prekidanje struje dolaze u obzir: visokonaponski osigurači, sklopke i učinski rastavljači. Njihova upotreba ovisi o nazivnom naponu, struji u normalnom pogonu, te o struji kratkog spoja.

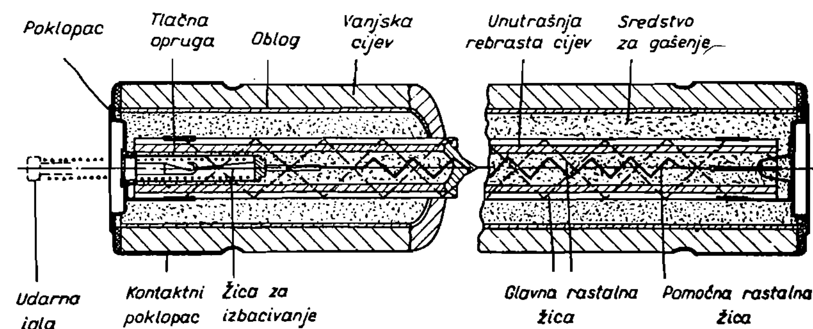
B. Visokonaponski osigurači

a) Opis

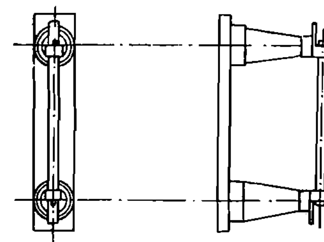
Visokonaponski osigurači sastoje se od porculanske cijevi u kojoj je smješteno više paralelno spojenih tankih srebrenih vodiča na posebnim nosačima, koji osiguravaju određeni položaj vodiča. Cijev je ispunjena kremenim pijeskom (sl. 4.61). Krajevi cijevi provideni su metalnim kapama na koje su spojeni vodiči i koje dolaze među kontakte postolja osigurača (sl. 4.62).

b) Taljenje osigurača

Prolazom struje kroz vodiče osigurača, a radi djelatnog otpora, razvija se toplina, od koje dio zagrijava vodiče, dok se drugi dio predaje okolini. Tu pojavu možemo prikazati jednadžbom



Slika 4.61. Presjek kroz visokonaponski osigurač



Slika 4.62. Visokonaponski osigurač s postoljem

$$i^2 R\, dt = M c\, d\vartheta + A \beta \vartheta\, dt \qquad \ldots (4.119)$$

gdje su: i (A) momentana vrijednost struje kroz osigurač, R (Ω) djelatni otpor vodiča u osiguraču, t (s) vrijeme, M (kg) masa vodiča u osiguraču, c (Ws/kg, °C) specifična toplina vodiča, ϑ (°C) temperatura vodiča, A (m²) površina vodiča, a β (W/m², °C) koeficijent prelaza topline. Prema tome lijeva strana (4.119) prikazuje toplinu koja se zbog prolaza struje razvija u osiguraču za vrijeme dt, dok na desnoj strani prvi član predstavlja toplinu koja se troši za ugrijavanje vodiča, a drugi toplinu koju vodič predaje okolini. Postavimo sada da je

$$R = \varrho_o (1 + \alpha \vartheta) \frac{l}{q} \qquad \ldots (4.120)$$

gdje je ϱ_o (Ω m²/m) specifični otpor na 0 °C, dok je α temperaturni koeficijent. Masa vodiča osigurača M može se prikazati kao

$$M = q\, l\, \gamma \qquad \ldots (4.121)$$

gdje je γ (kg/m³) gustoća vodiča, a površina vodičâ

$$A = d \pi l \qquad \ldots (4.122)$$

gdje je d (m) promjer vodiča. Uzmemo li u obzir da je $q = d^2 \pi/4$, nakon uvrštavanja i sređenja dobivamo

$$i^2 \, dt = \frac{d^4 \pi^2 \gamma c}{16 \varrho_o} \frac{d\vartheta}{1 + \alpha \vartheta} + \\ + \frac{d^3 \pi^2 \beta \vartheta}{4 \varrho_o (1 + \alpha \vartheta)} dt \qquad \ldots (4.123)$$

Prilikom određivanja izraza (4.123) učinjeno je nekoliko pojednostavnjenja. Pošlo se od pretpostavke da je početna temperatura 0 °C, da bi se pojednostavnilo pisanje formula. Dalje je pretpostavljeno da je toplina koja se predaje okolini proporcionalna površini plašta, što vrijedi približno za dugu žicu u mirnom zraku. Konstante materijala (specifični otpor, specifična toplina) ovisne su o temperaturi. Budući da se radi samo o principijelnom prikazu prilika, računat ćemo da je specifična toplina konstantna, dok ćemo za specifični otpor uzeti u obzir samo linearnu ovisnost, a kvadratična ovisnost o temperaturi bit će zanemarena. I kad bismo uzeli u obzir sve te ovisnosti, zanemarili bismo činjenicu da su prilike u izvedenom osiguraču znatno kompliciranije, jer su vodiči okruženi kremenim pijeskom, jer se ne radi o ravnom vodiču, jer postoji i uzdužno odvođenje topline radi kapa na krajevima osigurača itd. Sve to treba imati u vidu kad se razmatraju rezultati dobiveni iz relacije (4.119). Međutim, kako će se pokazati, rezultati se ne razlikuju bitno od eksperimentalno utvrđenih odnosa.

Promotrimo najprije granični slučaj kad vodič osigurača dostigne temperaturu taljenja, ali se ne rastaljuje, jer se sva toplina razvijena u njemu predaje okolini. Vodič, dakle, ostaje na konstantnoj temperaturi, i kroz njega protječe granična izmjenična struja s efektivnom vrijednošću I_g. Budući da je temperatura konstantna, diferencijal $d\vartheta = 0$ i $\vartheta = \vartheta_t$, gdje je ϑ_t temperatura taljenja, pa je (4.123)

$$i^2 \, dt = \frac{\pi^2 \beta \vartheta_t}{4 \varrho_o (1 + \alpha \vartheta_t)} d^3 \, dt \qquad \ldots (4.124)$$

Integriranjem u granicama od 0 do T, gdje je T vrijeme potrebno da vodič dostigne temperaturu taljenja, i dijeljenjem sa T, dobivamo

$$\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \, dt = I_g^2 = \frac{\pi^2 \beta \vartheta_t}{4 \varrho_o (1 + \alpha \vartheta_t)} d^3 \qquad \ldots (4.125)$$

U razlomku na desnoj strani nalaze se — osim promjera d — samo konstante ovisne o materijalu vodiča, pa se može postaviti

$$I_g^2 = k_1 d^3 \qquad \ldots (4.126)$$

odnosno

$$I_g = k_2 d^{1,5} \qquad \ldots (4.127)$$

Iz (4.127) može se izvesti ovisnost presjeka vodiča u osiguraču o nazivnoj struji I_n (A) osigurača. Između granične struje I_g i nazivne struje osigurača može se postaviti relacija

$$I_n = k_3 I_g \qquad \ldots (4.128)$$

gdje je k_3 konstanta (obično nešto manja od jedinice). Uvrštavanjem u (4.128) i uzimanjem u obzir odnosa između promjera i presjeka, dolazimo do relacije

$$q = k_4 I_n^{1,33} \qquad \ldots (4.129)$$

gdje je k_4 konstanta. Ispitivanjem visokonaponskih osigurača određene proizvodnje ustanovljeno je (Lit. 42) da vrijedi odnos

$$q = 0{,}0037 \, I_n^{1,22} \qquad \ldots (4.130)$$

odakle q dobivamo u mm², ako I_n uvrstimo u A. Relacija (4.130) pokazuje da (4.129), pa prema tome i (4.127), mogu dobro poslužiti pri kvalitativnim razmatranjima.

Razmotrimo drugi granični slučaj, kada je struja tako velika da izaziva taljenje osigurača u vrlo kratkom vremenu. U tom slučaju možemo pretpostaviti da se toplina ne odvodi, pa za (4.123) možemo napisati

$$i^2 \, dt = \frac{d^4 \pi^2 \gamma c}{16 \varrho_o} \frac{d\vartheta}{1 + \alpha \vartheta} \qquad \ldots (4.131)$$

Integriranjem lijeve strane od $t = 0$ do t_t, gdje je t_t vrijeme taljenja vodiča osigurača, te integriranjem desne strane od $\vartheta = 0$ do ϑ_t, dobivamo

$$\int_0^{t_t} i^2 \, dt = \frac{d^4 \pi^2 \gamma c}{16 \varrho_o \alpha} \ln (1 + \alpha \vartheta_t) \qquad \ldots (4.132)$$

Na desnoj strani su sve veličine, osim promjera d, konstante i ovisne o materijalu vodiča, pa možemo napisati

$$\int_0^{t_t} i^2 \, dt = k_5 d^4 \qquad \ldots (4.133)$$

I struja I_g (4.126) i vrijednost integrala (4.133) ovise o promjeru vodiča pa uvrštavanjem vrijednosti za d iz (4.126) možemo doći do izraza

$$\int_0^{t_t} i^2 \, dt = k_6 I_g^{\frac{8}{3}} \qquad \ldots (4.134)$$

odnosno, uzevši u obzir i (4.128)

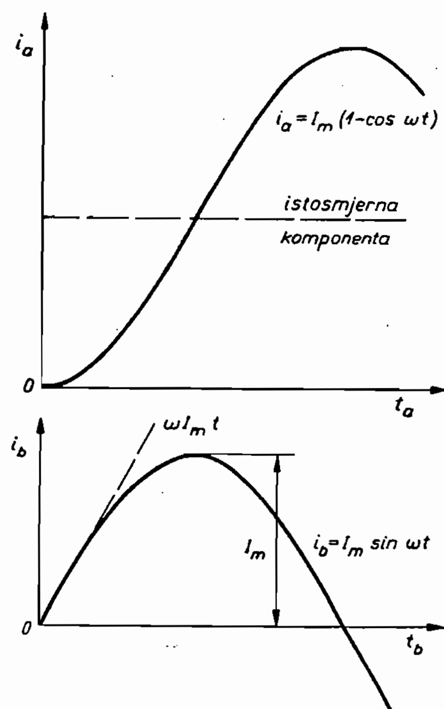
$$\int_0^{t_t} i^2 \, dt = k_7 I_n^{\frac{8}{3}} \qquad \ldots (4.135)$$

Vrijednost integrala proporcionalna je — uz učinjene pretpostavke — ugrijavanju vodiča, a ovisna je o promjeni vrijednosti struje za vrijeme kratkog spoja. Da se ustanovi taj utjecaj, korisno je razmotriti dva krajnja slučaja: a) kratki spoj je nastao u trenutku kad napon prolazi kroz vrijednost nula, pa se pojavljuje maksimalna vrijednost istosmjerne komponente struje kratkog spoja i b) kratki spoj je nastao u trenutku kad je napon maksimalan, pa se pojavljuje samo izmjenična komponenta struje

kratkog spoja (sl. 4.63). Ako zanemarimo smanjenje istosmjerne komponente, što možemo učiniti jer se radi samo o prvoj četvrtini periode, za momentane vrijednosti struje dobivamo

$$i_a = I_m (1 - \cos \omega t) \qquad \dots (4.136a)$$

$$i_b = I_m \sin \omega t \qquad \dots (4.136b)$$

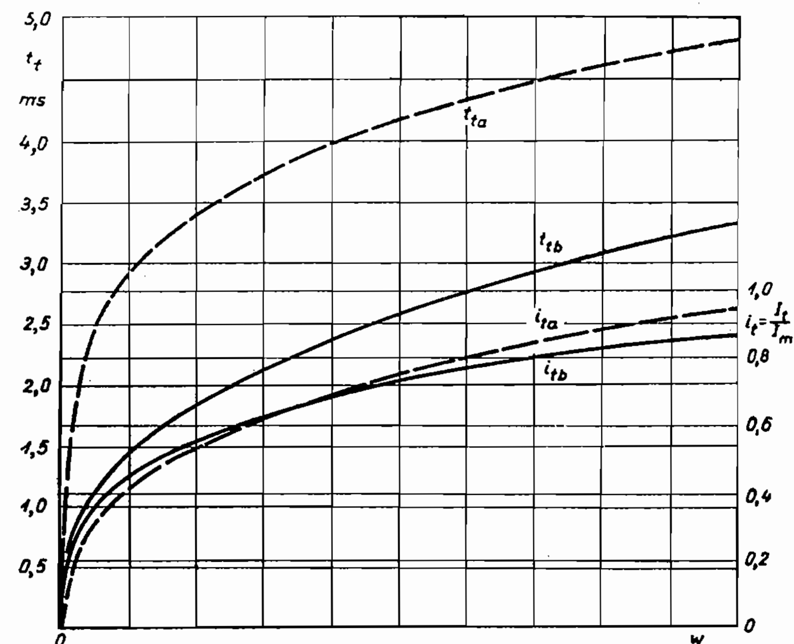


Slika 4.63. Struja kratkog spoja: (a) nastanak u momentu $e = 0$; (b) nastanak u momentu $e = E_m$

Vrijednost integrala (4.133) proporcionalna je — kako je već spomenuto — ugrijavanju vodiča, pa ćemo iz izjednačenja integrala

$$\int_0^{t_{ta}} i^2_a \, dt = \int_0^{t_{tb}} i^2_b \, dt \qquad \dots (4.137)$$

što se postiže za različita trajanja kratkog spoja t_{ta} i t_{tb}, moći odrediti vremena rastaljenja istovrsnih osigurača za dva spomenuta slučaja kratkog spoja, a i veličinu struje pri kojoj će se rastaliti vodič u osiguraču. Na sl. 4.64, prikazane su relativne vrijednosti struje taljenja (u odnosu na tjemenu vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja), te vrijeme potrebno za taljenje vodiča. Na apscisi imamo potrebnu toplinu za taljenje vodiča. Veličine struje taljenja ne razlikuju se znatnije u dva promatrana momenta nastanka kratkog spoja, dok će trajanje kratkog



Slika 4.64. Struja taljenja osigurača i vrijeme trajanja kratkog spoja: (a) nastanak kratkog spoja u momentu $e = 0$ i (b) u momentu $e = E_m$

spoja biti znatno dulje, ako se pojavi puna vrijednost istosmjerne komponente. Razlika u trajanju nastaje radi razlike porasta struje kratkog spoja. Pri određivanju struje taljenja može se, dakle, poći od slučaja kad se pojavljuje samo izmjenična komponenta struje kratkog spoja, jer do taljenja obično dolazi tokom prve osmine periode. Taj dio sinusoide može se (sl. 4.63) aproksimirati pravcem

$$i = \omega I_m t \qquad \dots (4.138)$$

pa je vrijednost integrala (4.135)

$$\int_0^{t_t} i^2 \, dt = \frac{1}{3} \omega^2 I^2_m t^3_t = k_7 I_n^{\frac{8}{3}} \qquad \dots (4.139)$$

Struja taljenja jest — prema (4.138)

$$i_t = \omega I_m t_t \qquad \dots (4.140)$$

pa uvrštavanjem vrijednosti za t_t u (4.139) dobivamo

$$i_t = k_8 \sqrt[3]{I_k I_n^{2,667}} \qquad \dots (4.141)$$

gdje je I_k efektivna vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja. U konstanti k_8 uzete su naravno u obzir ranije upotrijebljene konstante, i prelaz od tjemene na efektivnu vrijednost struje kratkog spoja.

Uzimajući u obzir (4.129), iz koje možemo odrediti I_n, te nakon uvrštavanja u (4.141), dobivamo

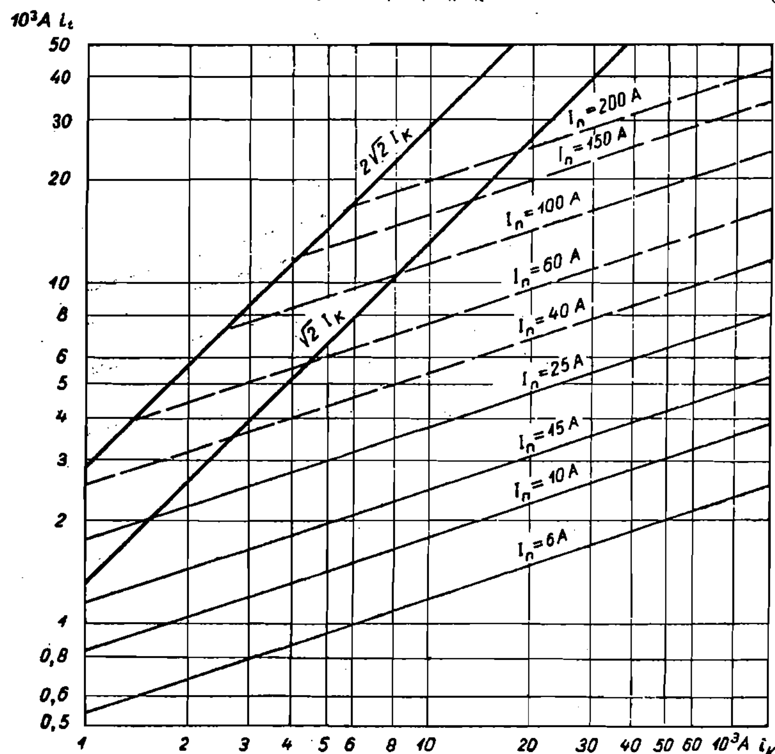
$$i_t = k_9 \sqrt[3]{I_k q^2} \qquad \dots (4.142)$$

Konstantu k_9 možemo izračunati poznavajući karakteristike materijala osigurača na osnovu prikazanih izvoda i ona iznosi

$$k_9 = 525 \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}\right)^{\frac{2}{3}} \qquad \dots (4.143)$$

Vrijednost k_9 potvrđena je i oscilogramima (Lit. 42). Uvrštavanjem relacije (4.130) u (4.142) dobivamo

$$i_t = 12{,}6 \sqrt[3]{I_k I_n^{2,439}} \qquad \dots (4.144)$$



Slika 4.65. Ovisnost struje taljenja osigurača (i_t) o efektivnoj vrijednosti izmjenične komponente struje kratkog spoja (I_K) i nazivne struje osigurača (I_n)

Izraz (4.144) prilično se dobro slaže s relacijom (4.141) koja je određena teoretskim razmatranjem.

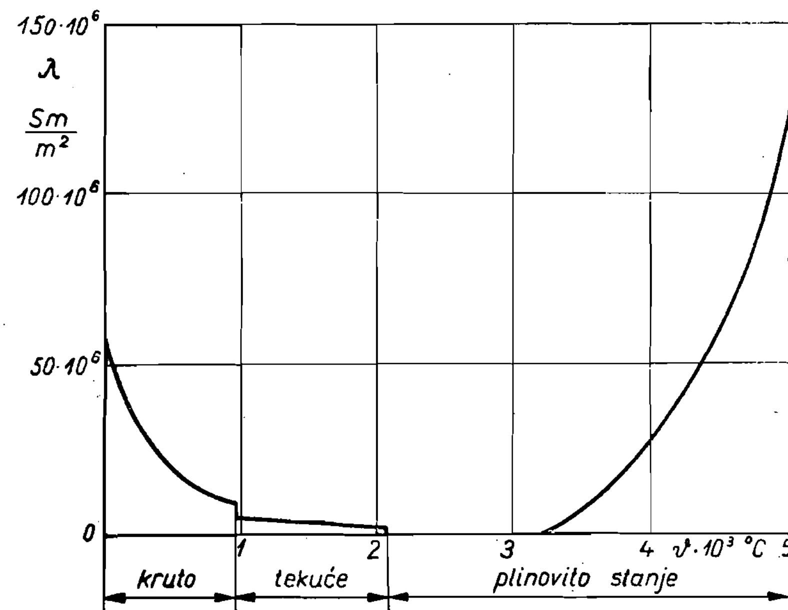
Naravno da (4.144) vrijedi za osigurače određene proizvodnje i određenog tipa.

Veličinu struje taljenja možemo prikazati dijagramom kao što je onaj na sl. 4.65. Struje taljenja prikazane su za različite nazivne struje osigurača, u ovisnosti o efektivnoj vrijednosti izmjenične komponente struje kratkog spoja. Određivanje struja taljenja, prema (4.144) i prema sl. 4.65, ima smisla samo ako je manja od tjemene vrijednosti izmjenične komponente. Ako je, dakle, $i_t \geq \sqrt{2}\, I_k$, prema (4.144) neće doći do pregaranja osigurača u prvoj četvrtini periode. Međutim, budući da dolazi do smanjenja porasta struje kad se ona približi tjemenoj vrijednosti, neće doći do pregaranja osigurača ni onda ako je i_t nešto manja od tjemene vrijednosti, jer je račun proveden uz pretpostavku da struja raste u pravcu. Za ostale vrijednosti struje i_t dijagram na sl. 4.65. daje tačne vrijednosti. Ako npr. efektivna vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja, koja protječe kroz osigurač nazivne struje 40 A, iznosi 20 kA, struja taljenja osigurača iznosit će 7 kA.

c) Prekidanje struje

Promotrimo najprije pojave do kojih dolazi od taljenja vodiča u osiguraču do prekida strujnog kruga.

Pri vrlo velikim gustoćama (10000 A/mm² i više) topljiva žica u osiguraču trenutačno će se rastaliti po čitavoj duljini i naglo ispariti. Me-

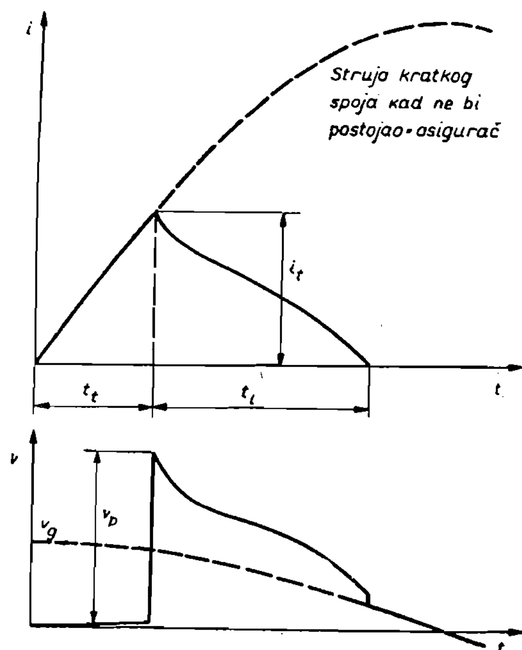


Slika 4.66. Vodljivost (λ) srebra u ovisnosti o temperaturi (ϑ)

talne pare ekspandiraju u okolni kremeni pijesak, pa presjek rastaljene metalne žice gotovo trenutačno postaje jednak nuli. Na sl. 4.66. prikazana je vodljivost srebra u ovisnosti o temperaturi (Lit. 41). Električna vodljivost srebra pada s povišenjem temperature. Na temperaturi taljenja, a nakon rastaljenja, vodljivost pada na polovinu vrijednosti. S povećanjem temperature vodljivost i dalje pada, da bi postigla vrijednosti nula (izolator!) kad se sva količina srebra ispari. Srebro se vlada kao izolator sve dok ne nastupi ionizacija (oko 3200 °C). Daljnje povišenje temperature dovodi do povećanja vodljivosti srebra. Prema tome se otpor žice naglo povećava do neizmjerno velike vrijednosti, kad je sva žica isparena. S povećanjem otpora smanjuje se struja kroz osigurač od početne vrijednosti i_t (struja taljenja) na nulu i to u većini slučajeva prije nego što bi struja kratkog spoja postigla vrijednost nula.

Na sl. 4.67. prikazan je primjer oscilograma struje i napona za vrijeme djelovanja osigurača. Nakon taljenja osigurača struja počinje opadati, a radi induktiviteta (L) mreže inducira se napon, koji se superponira naponu izvora (v_g). Ako sa v označimo napon na osiguraču, možemo postaviti

$$v = v_g - L \frac{di}{dt} \qquad \dots (4.145)$$



Slika 4.67. Tok struje i napona prije (t_t) i nakon (t_l) taljenja osigurača

jer djelatni otpor mreže možemo zanemariti. Budući da struja nakon taljenja vodiča opada, $\frac{di}{dt}$ je negativno, pa je napon na osiguraču veći od napona mreže. Radi naglog opadanja struje pojavit će se znatno povećanje napona. Do slične situacije doći će ako je gustoća struje u osiguraču manja od navedene, ali veća od 1000 A/mm². Tada će se žica u osiguraču rastaliti po cijeloj duljini, ali neće doći do spontanog isparavanja. Tanki vodič raspada se u kapljice radi djelovanja površinskih naprezanja i radi djelovanja elektromagnetskog polja. Zbog djelovanja tih sila dolazi naglo do formiranja kapljica. Među kapljicama nastaju električni lukovi. Metalne kapljice djelomično poniru u okolni pijesak, a djelomično se isparavaju. Zbog intenzivnog hlađenja luk se vrlo brzo gasi. I u tom slučaju dolazi do velikih prenapona. Pri još manjim gustoćama struje žica se rastali na jednom ili više kraćih dijelova, gdje je presjek slučajno bio manji. Zbog nastalog električnog luka žica se dalje topi, pa jedan dio rastaljene žice ponire u pijesak, a drugi se isparava. Radi povećanja otpora u osiguraču struja opada sve dok se toplina razvijena u luku toliko ne smanji, da se luk ohladi ispod temperature ionizacije.

Zbog svega toga vodič se u osiguraču ne izvodi istog presjeka na cijeloj duljini. Vodiči u starijim osiguračima imali su na polovini duljine nešto smanjen presjek. Na taj način se postiže to da se najprije rastali i ispari samo dio duljine vodiča, stvara se luk manje duljine, struja opada polaganije nego kad se stvori luk na cijeloj duljini vodiča, pa je i povišenje napona manje. Nakon toga dolazi do taljenja i isparivanja dijelova većeg presjeka, što dovodi do produženja luka i do ponovnog povišenja napona. Nastojalo se osigurač tako konstruirati da drugo povišenje napona ne bude veće od prvog. No i pored toga bili su prenaponi, koji su se javljali, visoki i premašivali su dvostruku tjemenu vrijednost nazivnog napona.

Da bi se to povišenje smanjilo, osigurači se danas izvode sa stepenovanim presjekom. Najmanji presjek ima vodič na polovini duljine, pa se on sve više povećava, što je vodič bliže krajevima. Na taj način ostvaruje se povišenje napona koje se kreće oko 1,5 tjemene vrijednosti nazivnog napona.

Smanjenje povišenja napona dovodi do produljenja trajanja prekida struje (produljenja vremena t_l na sl. 4.67), posljedica čega je povećanje količine energije koju treba u osiguraču pretvoriti u toplinu. Ako, naime, relaciju (4.145) pomnožimo s momentanom vrijednošću struje i diferencijalom vremena dt, dobit ćemo

$$v\, i\, dt = v_g\, i\, dt - L\, i\, di \qquad \dots (4.146)$$

Integriranjem lijeve strane i prvog člana na desnoj strani od t_t do $t_t + t_l$, a drugog člana na desnoj strani od $i = i_t$ do $i = 0$, dobit ćemo

$$\int_{t_t}^{t_t+t_l} v\, i\, dt = \int_{t_t}^{t_t+t_l} v_g\, i\, dt + \frac{L\, i_t^2}{2} \qquad \dots (4.147)$$

Prvi član na desnoj strani predstavlja energiju koju daje generator, dok je drugi član jednak magnetskoj energiji mreže, koja je akumulirana

u mreži u trenutku taljenja osigurača, jer u tom trenutku kroz osigurač protječe struja i_t. Zbroj tih dviju količina jednak je količini energije koju nazivamo energijom gašenja. Što je ta količina energije veća, teže će se luk u osiguraču ugasiti, jer će se razviti veća količina topline koju treba odvesti, da bi se dovoljno snizila temperatura u osiguraču kako bi pala ispod temperature ionizacije. Na hlađenje znatno utječe kremeni pijesak koji se nalazi oko vodiča. Poslije isparavanja vodiča električni luk ima na raspolaganju u pijesku kanal vrlo malog presjeka, pa se radi dobrog kontakta s pijeskom intenzivno hladi. Kremeni pijesak određene granulacije pokazao se je najpogodnijim radi dobrog odvođenja topline i velike brzine kojom u njega difundiraju metalne pare.

Sposobnost prekidanja struje osiguračem karakterizirana je energijom gašenja. Ako, naime, neki osigurač može prekinuti struju koja ima W_1 energiju gašenja, moći će prekinuti i struju s energijom gašenja W_2, ako je $W_2 \leqq W_1$.

Teoretska (Lit. 43) i eksperimentalna (Lit. 47) ispitivanja su pokazala da energija gašenja ovisi o veličini struje kratkog spoja, uz ostale najnepovoljnije okolnosti. Najnepovoljnije je za osigurač ako njegovo taljenje nastupi 0,5 do 1,5 ms (kod 50 Hz) prije nego što je napon generatora postigao tjemenu vrijednost (Lit. 46), radi relativno velikog udjela energije iz generatora. Maksimalnu energiju gašenja postižemo pri tzv. kritičnoj struji kratkog spoja (I_{kr}), koja se može prikazati kao višekratnik nazivne struje osigurača (I_n). Moderni osigurači imaju slijedeći omjer I_{kr}/I_n u ovisnosti o nazivnoj struji:

nazivna struja (I_n) A	omjer $\frac{I_{kr}}{I_n}$
6	~ 30
10	~ 40
15	~ 50
25	~ 60
40	~ 65
60	~ 75
100	~ 90
150	~ 90
200	~ 90

Pri većim strujama kratkog spoja energija gašenja postaje sve manja, u prvom redu radi smanjenja magnetske energije $\frac{1}{2} L i_t^2$, što mogu pokazati slijedeća razmatranja. Struja tropolnog kratkog spoja određuje se iz relacije

$$I_K = \frac{V}{X_d''} = \frac{V}{\omega L} \qquad \ldots (4.148)$$

pa je

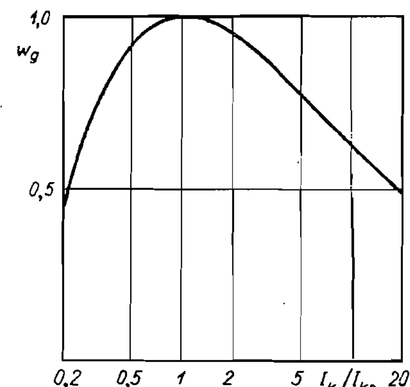
$$L = \frac{V}{\omega I_K} \qquad \ldots (4.149)$$

Veličinu i_t imamo u (4.142), pa je

$$\frac{L i_t^2}{2} = \frac{k_{10}}{\sqrt[3]{I_K}} \qquad \ldots (4.150)$$

jer su sve ostale veličine, osim I_K, konstantne za promatrani tip osigurača. Izgleda na prvi pogled neshvatljivo da je magnetska energija mreže manja kad je struja kratkog spoja veća. No to ćemo shvatiti, ako uzmemo u obzir da na magnetsku energiju ima veći utjecaj induktivitet mreže, koji je obrnuto proporcionalan struji kratkog spoja, dok je struja i_t proporcionalna trećem korijenu struje kratkog spoja, pa smanjenje induktiviteta više utječe nego povećanje struje taljenja.

Na sl. 4.68. prikazan je primjer ovisnosti energije gašenja o struji kratkog spoja.



Slika 4.68. Primjer ovisnosti energije gašenja (w_g) o omjeru struje kratkog spoja (I_K) i kritične struje (I_{kr})

Zbog svega toga rasklopna snaga osigurača može biti i vrlo velika.

d) Izbor osigurača

Izbor osigurača vrši se prema nazivnom naponu mreže i prema nazivnoj struji.

Osigurači opisane izvedbe izrađuju se za nazivne napone do uključivo 35 kV.

Nazivna struja osigurača odabire se prema dijelu mreže koji će štititi osigurač. Za dalekovod se odabire osigurač prema najvećoj struji koja se može pojaviti u normalnom pogonu, a za kabel prema najvećoj dopuštenoj trajnoj struji, koja je određena s obzirom na dopušteno ugrijavanje. Nazivna struja osigurača postavljenih za zaštitu transformatora određuje se prema nazivnoj struji transformatora, ali tako da nazivna struja osigurača bude približno dva puta veća od nazivne struje transformatora, kako bi se spriječilo pregaranje osigurača pri uklapanju transformatora. Isto vrijedi za osiguranje kondenzatorskih baterija. Za osiguranje naponskih transformatora upotrebljava se osigurač najmanje nazivne struje. Neke tvornice, naime, proizvode osigurače od 2 A, a neke od 6 A, kao osigurače najmanje nazivne struje.

Prema provedenom razmatranju o prekidanju struje moglo bi se zaključiti da osigurač koji može prekinuti I_{kr} može prekinuti i svaku veću struju. Međutim radi mehaničkih naprezanja osigurača ipak postoji gornja granica, koja je vrlo visoka. Tvornica Siemens (Lit. 25) navodi (tab. 4.13) npr. da osigurač nazivne struje 6 A za napon 30 kV može prekinuti struju rasklopne snage 1500 MVA.

Iz tab. 4.13. je vidljivo, osim toga, za koje nazivne struje spomenuta tvornica proizvodi osigurače za pojedine nazivne napone.

TABLICA 4.13.

Rasklopne snage osigurača (Lit. 25)

Nazivni napon (kV)	3	6	10	20	30
Nazivna struja (osigurača (A)	Rasklopna snaga (tropolno) MVA				
6	450	800	1200	1000	1500
10	450	800	1200	1000	1500
15	450	800	1200	1000	1500
25	450	800	1200	1000	1500
40	450	800	1000	1000	—
60	450	700	1000	—	—
100	400	700	1000	—	—
150	400	700	—	—	—
200	400	—	—	—	—

Naravno da se spomenute rasklopne snage odnose na struju kratkog spoja, koja bi potekla kad ne bi postojao osigurač koji će je prekinuti prije nego što postigne tjemenu vrijednost Maksimalnu struju — definiranu kao struju taljenja i_t — možemo odrediti prema relaciji (4.141). Tvornica Siemens za svoje osigurače daje (Lit. 25) tablicu i dijagram (sl. 4.69) prema kojima se može odrediti struja i_t. Određivanje struje i_t vrši se u dva koraka. Prvi je određivanje struje taljenja pri efektivnoj vrijednosti izmjenične komponente struje kratkog spoja $I_K = 10$ kA. Ta struja taljena i_{t10} određuje se iz tablice na sl. 4.69, prema nazivnoj struji osigurača. Drugi je korak određivanje faktora

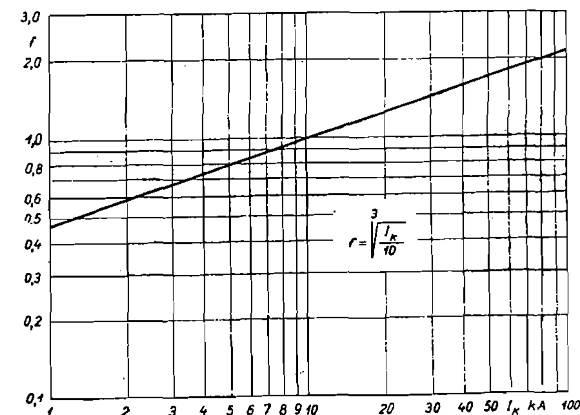
$$f = \sqrt[3]{\frac{I_k}{10}} \qquad \ldots (4.151)$$

gdje je I_k struja kratkog spoja u kA, što možemo očitati iz dijagrama na sl. 4.69. Struja taljenja i_t, maksimalna struja kroz osigurač, određuje se tada iz relacije

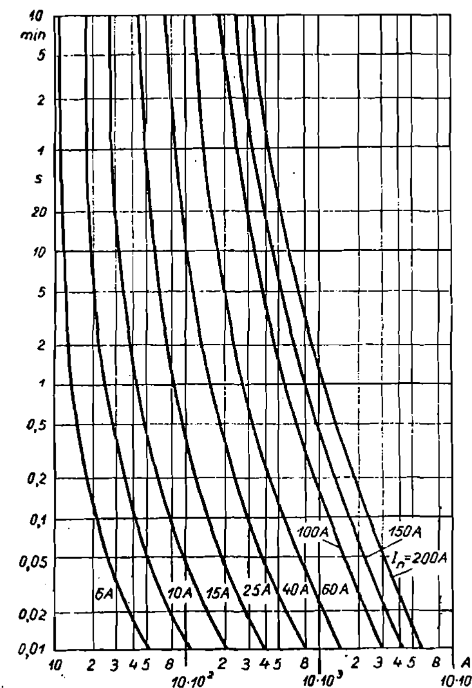
$$i_t = f\, i_{t\,10} \qquad \ldots (4.152)$$

Pri određivanju selektivnosti zaštite osiguračima potrebno je poznavati ovisnost vremena taljenja osigurača u ovisnosti o veličini struje i to za relativno male struje. Primjer za takvu ovisnost prikazan je na sl. 4.70 (Lit. 25).

I_n A	i_{t10} kA
6	0,707
10	1,33
15	1,90
25	3,25
40	5,43
60	7,58
100	12,4
150	16,0
200	18,5



Slika 4.69. Struje taljenja osigurača za efektivnu struju kratkog spoja 10 kA (tabela) i faktor f za određivanje struje talenja za struju različitu od 10 kA (dijagram)

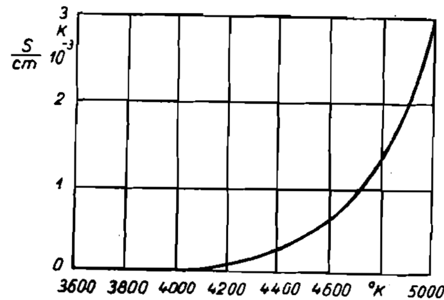


Slika 4.70. Ovisnost vremena taljenja osigurača o veličini struje za osigurače različitih nazivnih struja

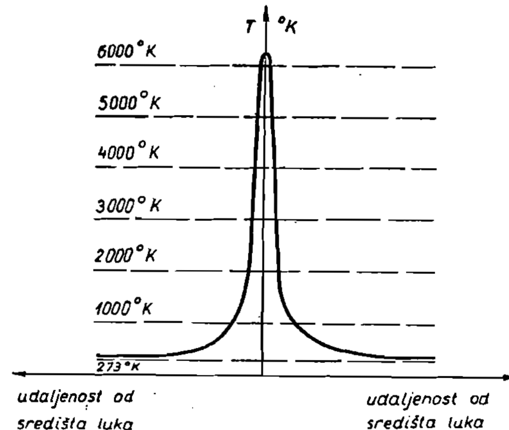
C. Sklopke

a) Električki luk

Isklapanjem sklopke kroz koju protječe struja, pojavit će se električki luk među kontaktima sklopke. U trenutku rastavljanja kontakata ugrije se njihov metal toliko da dolazi do taljenja i isparavanja radi vrlo velike gustoće struje na dodirnoj plohi neposredno prije rastavljanja. Prostor među kontaktima postaje radi toga vodljiv za struju, pa ona nastavlja protjecati i pored toga što su se kontakti rastavili. Vodljivost među kontaktima raste radi termoionizacije, što je posljedica visokih temperatura. Molekuli plina raspadaju se na ione i elektrone, a njihova ionizacija, a s tim i vodljivost, naglo rastu s porastom temperature (sl. 4.71). Visoke temperature vladaju u jezgri luka, čiji je presjek proporcionalan s jačinom struje, dok se temperature naglo smanjuju s udaljavanjem od jezgre (sl. 4.72). Temperature u jezgri luka dostižu i do 20000 °K (Lit. 63).



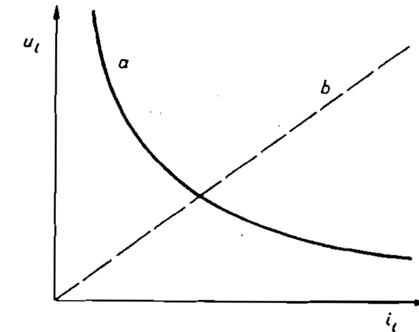
Slika 4.71. Vodljivost dušika kod 1 at u ovisnosti o temperaturi (Lit. 60)



Slika 4.72. Temperatura u električnom luku u ovisnosti o udaljenosti od središta luka (Lit. 62)

Napon koji vlada među kontaktima tjera struju kroz vodljivi stupac plinova, u kojemu se zbog električnog polja elektroni velikom brzinom kreću prema anodi, a ioni prema katodi. Pri tome se mogu u prostoru luka pojaviti novi nosioci naboja radi udarne ionizacije (sudar čestica) i radi termičke emisije elektrona (emisija elektrona iz užarene katode zbog djelovanja električnog polja).

Otpor luka (r_l) ovisan je o ionizaciji prostora među kontaktima, stupanj ionizacije ovisi o temperaturi, a ova o količini topline (Q Ws) koja se akumulira u luku. Ta toplina je razlika između topline razvijene u luku, koja je proprocionalna produktu napona (u_l) i struje (i_l) luka, i topline koja se predaje okolini. Otpor luka određene duljine i u određenom mediju jest funkcija struje i_l. Ta ovisnost otpora luka može se prikazati karakteristikom (sl. 4.73) napon—struja, jer otpor je omjer između napona i struje. U istom dijagramu prikazana je radi usporedbe (pravac b) i karakteristka napon—struja za otpor nezavisan o struji.



Slika 4.73. Karakteristika napon-struja luka (a) i karakteristika napon-struja za otpor nezavisan o struji (b)

Ako sa Q (Ws) označimo toplinu koja se akumulira u luku, ovisnost otpora luka možemo (Lit. 61) prikazati relacijom

$$r_l = r_{lo}\, e^{-Q/Q_o} \qquad \ldots (4.153)$$

gdje su r_{lo} i Q_o konstante ovisne o duljini luka i mediju u kojem gori luk. Veličina r_{lo} je otpor među kontaktima kad je $Q = 0$, dok je Q_o toplina uz koju otpor luka pada na 0,367 r_{lo}. Deriviranjem po vremenu, jer želimo razmatrati prilike kad je struja luka izmjenična, a uzimajući u obzir da je Q, pa prema tomu i r_l, funkcija vremena, te nakon uvrštavanja vrijednosti za r_{lo} iz (4.153), dobivamo

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q_o}{r_l}\,\frac{dr_l}{dt} \qquad \ldots (4.154)$$

Akumuliranu toplinu možemo, dalje, prikazati relacijom

$$dQ = (v_l\, i_l - P_0)\, dt \qquad \ldots (4.155)$$

gdje su $P_o\,dt$ toplina koju luk predaje okolini, a $v_l\,i_l\,dt$ toplina razvijena u luku prolazom struje i_l. Uvrštavanjem dQ iz (4.155) u (4.154), i uzevši u obzir da je

$$r_l = \frac{v_l}{i_l} \qquad \ldots (4.155a)$$

te da su i napon i struja luka funkcije vremena, dolazimo do izraza

$$Q_o\left(\frac{1}{i_l}\frac{di_l}{dt} - \frac{1}{v_l}\frac{dv_l}{dt}\right) = v_l\,i_l - P_o \qquad \ldots (4.156)$$

koji predstavlja ovisnost napona luka v_l (t) o bilo kakvoj promjeni struje i_l (t). Ako je struja luka

$$i_l = I_k \sin \omega t \qquad \ldots (4.157)$$

rješenje diferencijalne jednadžbe jest

$$v_l = \frac{2\,P_o}{I_k\left[1 - \dfrac{\sin(\omega t + \varphi)}{\sqrt{1 + (2\,\omega\,\vartheta)^2}}\right]} \qquad \ldots (4.158)$$

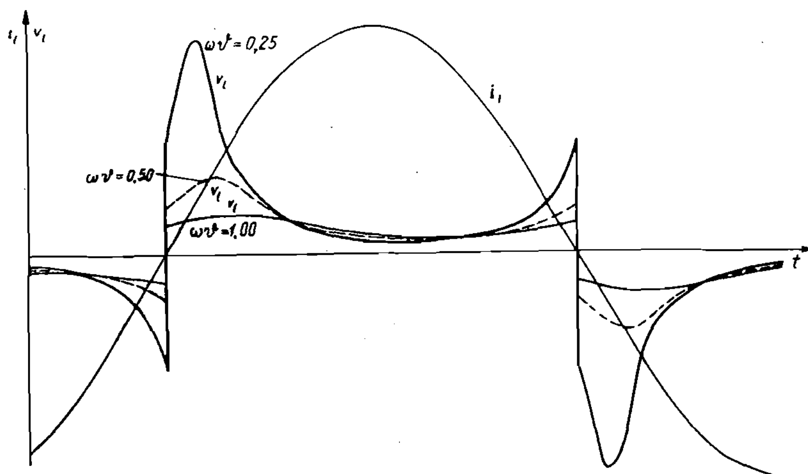
gdje je

$$\varphi = \text{arc cotg}\, 2\,\omega\,\vartheta \qquad \ldots (4.159)$$

i

$$\vartheta = \frac{Q_o}{P_o} \qquad \ldots (4.160)$$

Veličina ϑ je vremenska konstanta luka, tj. vrijeme potrebno da otpor luka poraste na vrijednost $e r_l$, ako struja postane jednaka nuli ($v_l\,i_l = 0$),

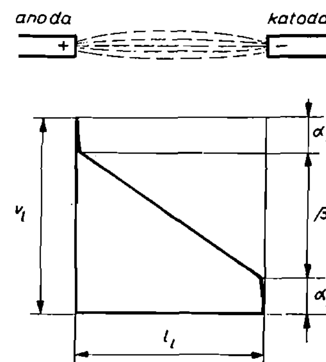


Slika 4.74. Ovisnost napona luka (v_l) o struji luka (i_l) za različite veličine $\omega\vartheta$ (4.160) uz konstantnu duljinu luka i uz konstantno odvođenje topline

te ako predaja topline okolini ostane konstantna (P_o = konst). Na sl. 4.74. prikazano je nekoliko krivulja v_l (t) za različite vrijednosti $\omega\,\vartheta$ = konst. i za konstantni omjer P_o/I_k. Treba naglasiti da prikazana promjena napona luka vrijedi za konstantan razmak među kontaktima. Naravno da promjena razmaka, odnosno duljine luka, utječe na otpor, a prema tome i na napon luka.

Pad napona u luku možemo podijeliti na dio neposredno uz kontakte i na dio u ostalom prostoru među kontaktima (sl. 4.75). Pad napona uzduž luka može se prikazati relacijom

$$v_l \cong a + \beta\, l_l \qquad \ldots (4.161)$$



Slika 4.75. Pad napona uzduž luka

gdje su $a = a_a + a_k$ (sl. 4.75), a l_l razmak među kontaktima. Veličine a i β su ovisne o temperaturi luka, o tlaku i mediju među kontaktima, o materijalu i izvedbi kontakata. Opadanjem temperature jezgre luka povećava se pad napona po jedinici duljine (β) i pad napona neposredno uz kontakte (a). Povećanjem tlaka medija u kojemu gori luk povećava se također pad napona luka. Na napon luka znatno utječe medij u kojemu luk gori. U tab. 4.14. navedeni su podaci o relativnom padu napona

TABLICA 4.14.

Relativni pad napona po jedinici duljine luka (Lit. 56)

	Relativni pad napona po jedinici duljine luka
Zrak	1
Dušik	1
Kisik	2,3
Ugljični dioksid	1,7
Vodena para	4,4
Vodik	13,5

po jedinici duljine luka (zrak ima pad napona 1) za neke medije. Najveći relativni pad napona ima vodik, pa se zbog toga i upotrebljavaju ulje (u parama ulja ima oko 70% vodika) i voda (dvije trećine vodika).

Energija luka određena je relacijom

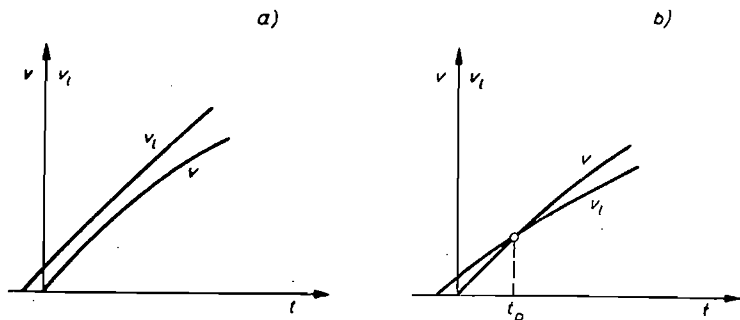
$$W_l = \int_0^{t_l} v_l \, i_l \, dt \qquad \ldots (4.162)$$

Odvođenje te topline osnovni je uvjet za gašenje luka, jer o tomu ovisi temperatura, a o temperaturi vodljivost medija. Što je kraće vrijeme trajanja luka t_l postižu se povoljnije prilike u sklopki.

b) Gašenje luka

Gašenje luka kompliciran je proces na koji utječu električke, magnetske, kemijske, termodinamičke i hidrodinamičke pojave. Koja će od tih pojava prevladati i preuzeti glavni utjecaj na gašenje luka ovisi o vrsti sklopke i o mediju za gašenje luka. U svim slučajevima, međutim, za gašenje luka potrebno je: a) vrlo brzo povećati razmak među kontaktima, kako bi se čim prije (radi smanjenja energije luka) postigla udaljenost na kojoj će se luk ugasiti i koja će biti dovoljna da se spriječi njegovo ponovno paljenje; b) smanjiti presjek luka, kako bi se povećao njegov pad napona (važno za gašenje luka istosmjerne struje) i c) pri tome osigurati intenzivno odvođenje topline.

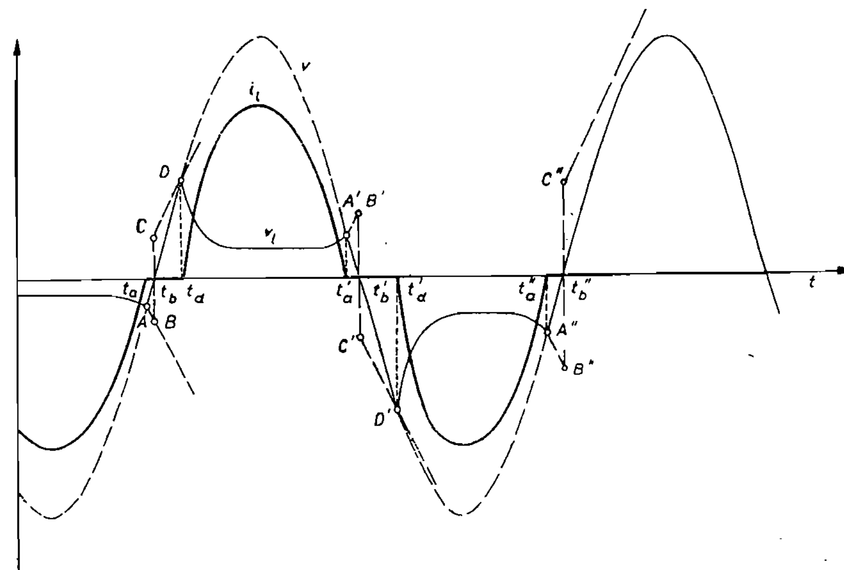
Gašenje luka izmjenične struje olakšano je činjenicom da napon mreže i struja luka nakon svake polovine periode prolaze kroz vrijednost nula. U trenutku kad struja prolazi kroz vrijednost nula gasi se luk, koji će se ponovno pojaviti ako je napon potreban za ponovno paljenje luka manji od napona mreže, odnosno ako je napon mreže dovoljan da svlada električnu čvrstoću razmaka među kontaktima. Nasuprot tome, ako je napon potreban za ponovno paljenje luka veći od napona mreže luk se neće ponovno upaliti i gašenje će biti postignuto. Električna čvrstoća prostora među kontaktima ovisi s jedne strane o prilikama prije gašenja luka, a s druge strane o intenzivnosti hlađenja. Prema tome električna čvrstoća funkcija je i vremena, kao i napon mreže koji vlada među kontaktima. Ako je električna čvrstoća — nakon gašenja luka — stalno veća (sl. 4.76a) od napona mreže, luk se neće ponovo upaliti. Ako, međutim, u jednom trenutku napon mreže postane veći (sl. 4.76b) od električne čvrstoće, luk će se ponovo upaliti do ponovnog prolaza struje kroz nulu.



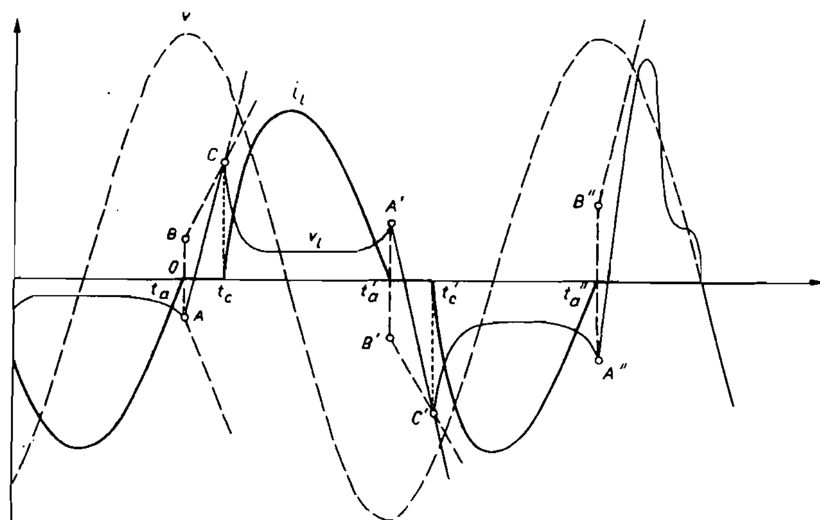
Slika 4.76. Promjena električne čvrstoće (v_l) prostora među kontaktima sklopke i napona mreže (v) nakon prolaza struje kroz nulu; (t_p) momenat ponovnog paljenja luka

Na sl. 4.77. prikazano je gašenje luka u strujnom krugu u kojemu postoji samo djelatni otpor ($\cos\varphi = 1$), a na sl. 4.78. gašenje luka u induktivnom strujnom krugu ($\cos\varphi = 0$).

U prvom su slučaju struja (i_l) i napon mreže (v) u fazi. Napon luka (v_l) u fazi je sa strujom. Struja će teći sve dok je napon luka manji od napona mreže. Smanjenjem struje raste napon luka, pa u trenutku t_a što odgovara tački A (sl. 4.77), dolazi do izjednačenja napona luka i napona mreže, pa i do gašenja luka. Radi daljnjeg povećanja razmaka kontakata i hlađenja prostora među kontaktima povećava se električna čvrstoća. To povećanje prikazano je pravcem kroz tačke A i B. Tačka C simetrična je s obzirom na os apscisa s tačkom B, a pravac kroz tačku C i D simetričan je s pravcem kroz tačku A i B. U trenutku t_d, kad električna čvrstoća (pravac kroz C i D) među kontaktima postane jednaka naponu mreže ponovo se pali luk, struja i_l raste, a napon luka v_l pada. Struja luka slijedi napon mreže, pa se opadanjem napona smanjuje i struja, što dovodi do povećanja napona luka. U trenutku t_a' ponovo dolazi do gašenja luka i do ponavljanja opisane pojave. Produljenjem luka zbog povećanja razmaka među kontaktima brže raste električna čvrstoća među kontaktima, pa će se luk konačno ugasiti (momenat t_a'') kad elek-



Slika 4.77. Promjena struje luka (i_l), napona luka (v_l) i napona mreže (v) prije konačnog gašenja luka za strujni krug s djelatnim otporom ($\cos\varphi = 1$)



Slika 4.78. Promjena struje luka (i_l), napona luka (v_l) i napona mreže (v) prije konačnog gašenja luka za strujni krug s induktivnim otporom ($\cos \varphi = 0$)

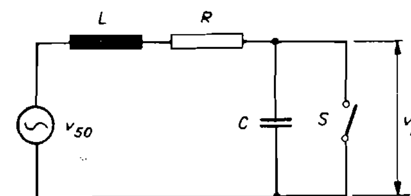
trična čvrstoća postane tolika da napon mreže neće biti dovoljan da ponovno uspostavi luk među kontaktima sklopke.

Na sl. 4.78. prikazane su prilike gašenja luka u induktivnom strujnom krugu. Električna čvrstoća među kontaktima mijenja se nakon gašenja luka po pravcu kroz tačku A, odnosno po pravcu kroz tačke B i C, koji je simetričan s obzirom na os apscisa. Napon među kontaktima u trenutku gašenja luka jednak je OA, pa radi kapaciteta mreže (dolazi do prelazne pojave koja je opisana u sljedećem poglavlju) ne može on trenutačno narasti na napon mreže u tom momentu. Porast napona među kontaktima mijenja se po pravcu kroz tačke A i C, pa se u trenutku t_c koji odgovara tački C, kada je napon među kontaktima jednak električnoj čvrstoći, ponovno pali luk. Luk gori sve do ponovog prolaza struje kroz nulu, kad se ponavlja već opisana pojava, ako električna čvrstoća ne postane tolika da onemogući ponovo paljenje luka. Napon među kontaktima nakon konačnog gašenja luka postaje jednak naponu mreže, ali tek nakon prelazne pojave, koja ovisi o induktivitetu i kapacitetu mreže. Utjecaj te pojave na gašenje luka bit će prikazan u slijedećem poglavlju.

c) Pojave nakon gašenja luka

Budući da je mreža pretežno induktivna, te da u njoj postoje kapaciteti, nakon konačnog gašenja luka dolazi do titranja napona među kontaktima sklopke. Tu prelaznu pojavu možemo principijelno odrediti iz sheme na sl. 4.79. Napon među kontaktima sklopke (nazvan i prekidnim naponom), nakon konačnog gašenja luka, možemo prikazati izrazom

$$v_p = v_m\,(1 - e^{-a\,t}\cos \omega_p\,t) \qquad \ldots (4.163)$$



Slika 4.79. Nadoknadna shema mreže za određivanje titranja napona među kontaktima sklopke nakon konačnog gašenja luka

gdje je a recipročna vrijednost vremenske konstante

$$a = \frac{R}{2L} \qquad \ldots (4.164)$$

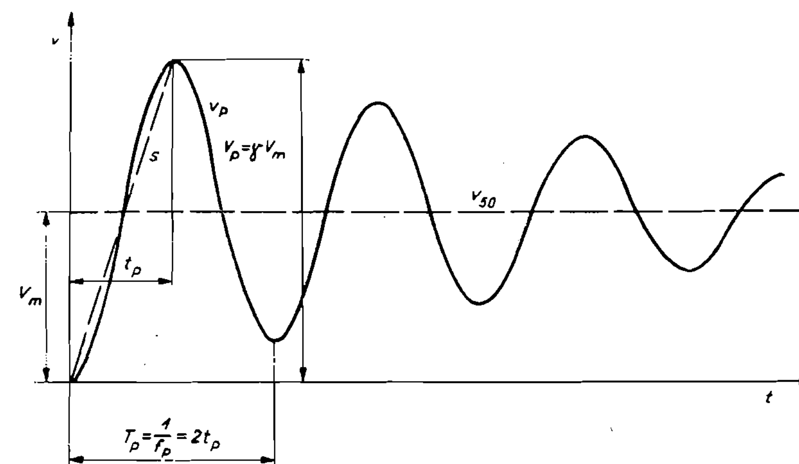
a ω_p kružna frekvencija prekidnog napona

$$\omega_p = 2\,\pi\,f_p = \frac{1}{\sqrt{L\,C}} \qquad \ldots (4.165)$$

Na sl. 4.80. prikazana je promjena napona među kontaktima sklopke. Uz pretpostavku da je kružna frekvencija prekidnog napona znatno veća od kružne frekvencije napona mreže (što je uvijek i ispunjeno), možemo napon mreže za vrijeme nekoliko prvih perioda smatrati konstantnim.

Pomoću dijagrama na sl. 4.80. mogu se definirati karakteristične veličine. Faktor amplitude γ određen je omjerom između maksimalne vrijednosti prekidnog napona V_p među kontaktima i tjemene vrijednosti napona mreže V_m

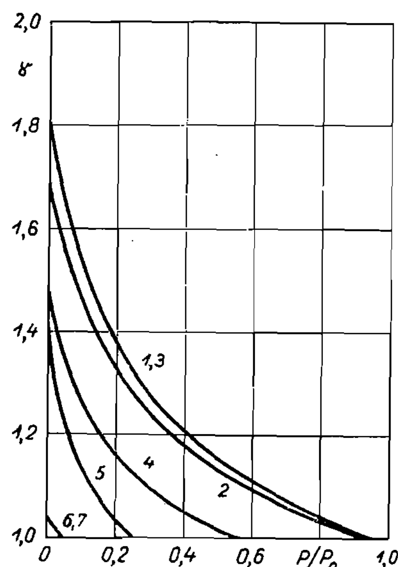
$$\gamma = \frac{V_p}{V_m} = \frac{V_p}{\sqrt{2}\,V} \qquad \ldots (4.166)$$



Slika 4.80. Promjena napona među kontaktima nakon konačnog gašenja luka

gdje je V efektivna vrijednost napona mreže. Napon mreže nazivamo i povratnim naponom. Vrijeme t_p jest trajanje od konačnog gašenja luka do pojave maksimalnog prekidnog napona. Ono je određeno relacijom

$$t_p = \frac{1}{2 f_p} \text{ s} \qquad \ldots (4.167)$$



Kri-vu-lja	Nazivni napon mreže kV	Maks. opterećenje mreže (P_0) MVA	Rasklopna snaga MVA	Vlastita frekvenc. mreže Hz
1	220	1600	4500	400
2			5000	
3		800	2700	
4	110			650
5	60	440	1500	900
6	10	400	1350	3000
7		100	340	

Slika 4.81. Ovisnost faktora amplitude γ (4.166) o omjeru stvarnog (P) i maksimalno mogućeg opterećenja (P_0) mreže za nekoliko mreža za koje su karakteristike navedene u tablici

gdje je f_p frekvencija prekidnog napona. Prosječna brzina porasta prekidnog napona određena je nagibom pravca s sa sl. 4.80. Tu brzinu porasta određujemo iz relacije

$$\Delta v_p = \frac{V_p}{t_p} \text{ V/s} \qquad \ldots (4.168)$$

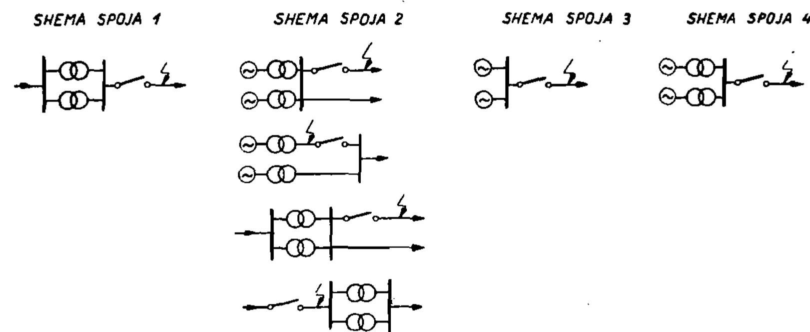
Ako se poznaju dvije od navedenih karakterističnih veličina, može se odrediti treća.

Zanemarimo li prigušenje, faktor amplitude postići će maksimalnu vrijednost $\gamma_{max} = 2$, dok će prosječna brzina porasta iznositi $\Delta v_{p\,max} = 4 f_p V_m$.

Visina prekidnog napona i frekvencija tog napona znatno utječu na konačno gašenje luka. Što je veći prekidni napon i što je viša frekvencija prekidnog napona, to teže je postići konačno gašenje luka.

Kao primjer visine prekidnog napona navodimo rezultate ispitivanja (Lit. 64). Na sl. 4.81. prikazana je ovisnost faktora amplitude γ (4.166) o opterećenju promatrane mreže. Smanjenje faktora amplitude s povećanjem opterećenja posljedica je djelovanja djelatnog otpora s kojim možemo prikazati djelatno opterećenje. Možemo smatrati (Lit. 56) da je taj otpor priključen paralelno kontaktima sklopke. Što je veće opterećenje, to je manji djelatni otpor, a veće prigušenje prekidnog napona. U mrežama vrlo visokog napona opterećenje je daleko od sklopke, pa je i utjecaj djelatnog otpora manji. Radi toga je u takvim mrežama i veći faktor amplitude.

Frekvencija prekidnog napona određena je karakteristikama mreže, pa se naziva i vlastitom frekvencijom mreže, koja je određena relacijom (4.165). Vlastita frekvencija mreže postaje sve manja što je nazivni napon veći, jer s povišenjem napona obično raste i induktivitet kratkospojenog kruga, kao i kapacitet, radi veće duljine vodova. Osim toga na vlastitu frekvenciju mreže utječe shema spoja mreže, koja ostaje priključena na izvore nakon isklapanja sklopke. S obzirom na shemu spoja treba razlikovati dva granična slučaja: a) napajanje jednog voda s jedne strane preko transformatora uz malu rasklopnu snagu na mjestu sklopke (shema spoja 1 na sl. 4.82), kad je vlastita frekvencija visoka i b) sklopka



Slika 4.82. Tipične sheme spoja s obzirom na vlastitu frekvenciju mreže

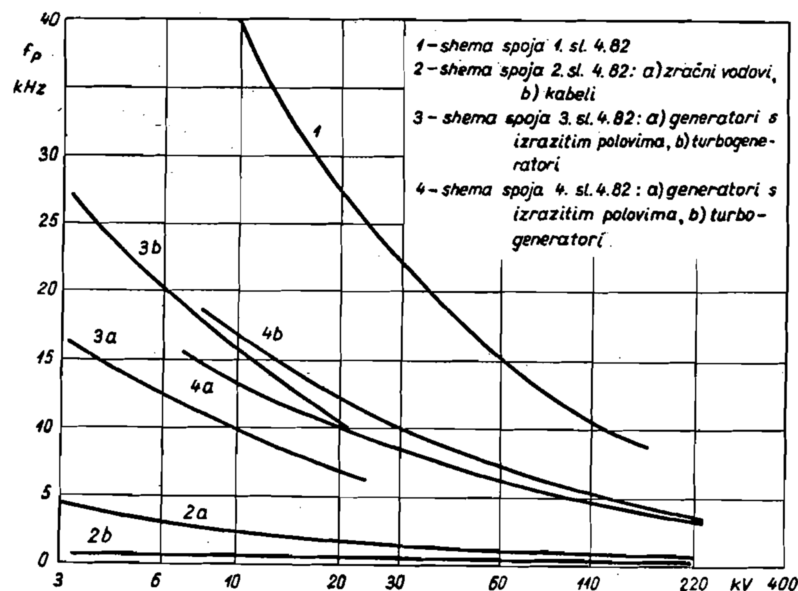
u velikoj mreži s velikom rasklopnom snagom (sheme spoja 2 na sl. 4.82), kad ostaju u neisklopljenom dijelu mreže uključeni dalekovodi, pa je radi velikih kapaciteta i vlastita frekvencija malena. Ostali slučajevi prikazani na sl. 4.82. (sheme spoja 3 i 4) predstavljaju međuslučajeve s obzirom na visinu vlastite frekvencije mreže (sl. 4.83). Vlastita frekvencija mreže ovisi, osim toga, o izvedbi generatora: generatori s izrazitim polovima imaju uz istu nazivnu snagu veću reaktanciju pa radi toga (sheme spoja 3 i 4) i mreža ima manju vlastitu frekvenciju. Utječe još i to radi li se o zračnim vodovima ili kabelima (sheme spoja 2), jer je u kabela produkt LC veći nego u zračnih vodova, pa kabelska mreža ima manju vlastitu frekvenciju.

Kao što se može vidjeti i iz gore spomenutih graničnih slučajeva, normalno se ne pojavljuju istodobno visoke vlastite frekvencije mreže i velike rasklopne snage.

Na sl. 4.84. prikazana je ovisnost vlastite frekvencije mreže o naponu mreže, prema projektu sovjetskog standarda i prema francuskom standardu (Lit. 56). Određivanje vlastite frekvencije mreže standardom potrebno je radi ispitivanja rasklopne moći sklopke. U standardima je određena i vlastita frekvencija mreže u slučaju isklapanja struje kratkog spoja, koja odgovara polovini nazivne rasklopne snage sklopke.

Vrlo visoka frekvencija prekidnog napona (red veličine 100 kHz) pojavit će se među kontaktima sklopke uz prigušnicu, jer prigušnica uz relativno velik induktivitet ima veoma malen kapacitet.

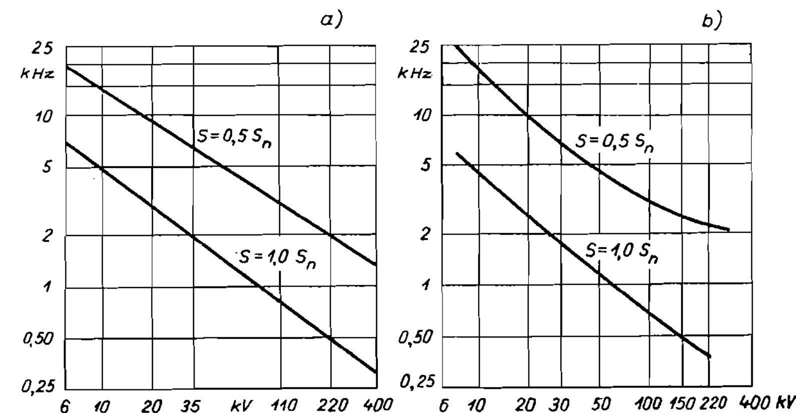
Ako kratki spoj ne nastane neposredno iza sklopke, već na vodu daleko od sklopke, pojavit će se među kontaktima sklopke prekidni napon, koji



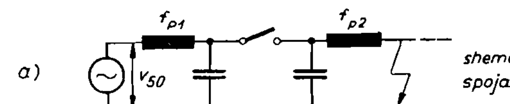
Slika 4.83. Ovisnost vlastite frekvencije mreže f_p o naponu mreže i o shemi spoja (sheme spoja prikazane su na sl. 4.82)

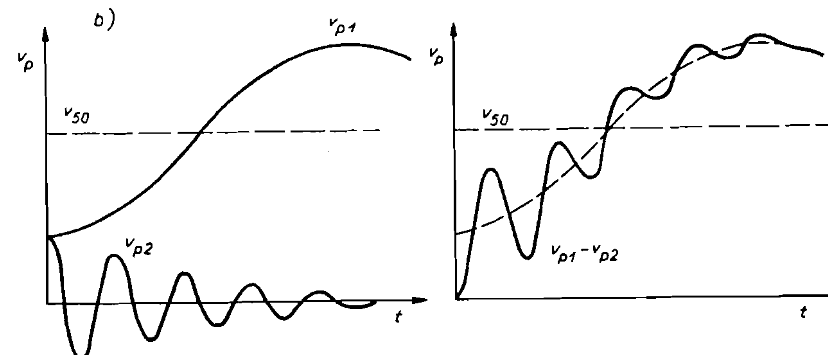
će se mijenjati sa dvije frekvencije. Dvije vlastite frekvencije posljedica su podjele mreže na dva dijela (sl. 4.85a). Među kontaktima sklopke djeluje razlika napona dvaju dijelova mreže (sl. 4.85b i 4.85c).

Računsko određivanje vlastite frekvencije nešto kompliciranijih mreža traži dugotrajne račune (Lit. 65, 66) ili znatna pojednostavnjenja (Lit. 44). Osim toga razvijen je niz metoda mjerenja vlastite frekvencije mreže a da se ne prekida opskrba potrošača (Lit. 67, 68. i 69), te modeli mreže za određivanje iste veličine (Lit. 70. i 71).



Slika 4.84. Vlastita frekvencija mreže u ovisnosti o naponu mreže: (a) prema prijedlogu sovjetskog standarda i (b) prema francuskom standardu. S_n nazivna rasklopna snaga sklopke





Slika 4.85. Prekidni napon među kontaktima sklopke u slučaju kad kratki spoj ne nastane neposredno iza sklopke

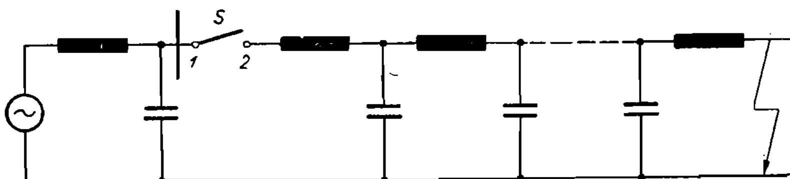
d) Faktor naprezanja sklopke pri prekidanju struje kratkog spoja

U novijoj literaturi (Lit. 72) pojavljuje se pojam »faktora naprezanja sklopke« (facteur de sévérité, Schwerefaktor), koji je definiran produktom struje kratkog spoja I_k u trenutku prekidanja struje kratkog spoja, tjemene vrijednosti prekidnog napona V_p (sl. 4.80) i brzine porasta prekidnog napona Δv_p (4.168). Faktor naprezanja sklopke jest

$$F_K = I_k V_p \Delta v_p \qquad \ldots (4.169)$$

Što je veći faktor F_K bit će teže prekinuti struju kratkog spoja. Taj faktor posljedica je razmatranja utjecaja mjesta kvara na vodu na brzinu porasta prekidnog napona.

Promotrimo, dakle, najprije taj utjecaj. Pođimo od ekvivalentne sheme mreže (sl. 4.86). Brzina porasta prekidnog napona među kontaktima sklopke S jednaka je razlici brzina porastâ napona na kontaktima 1 i 2 sklopke. Odredimo najprije brzinu porasta na kontaktu 2 iz slijedećeg razmatranja. Da bi se spriječilo dalje protjecanje struje kratkog spoja



Slika 4.86. Nadoknadna shema za određivanje brzine porasta prekidnog napona među kontaktima sklopke na početku voda

nakon njezina prolaza kroz nulu, bilo bi potrebno narinuti toliki napon koji bi kroz krug protjerao struju po iznosu jednaku, a po smjeru suprotnu, struji kratkog spoja, koja bi tekla da nema toga napona. Prema tome treba da bude

$$\mathbf{V}_{p2} = Z\,\mathbf{I}_k \qquad \ldots (4.170)$$

gdje su Z valni otpor voda na kojemu je nastao kratki spoj, a V_{p2} prekidni napon na kontaktu 2. Prema tome je

$$\frac{d\mathbf{V}_{p2}}{dt} = Z \frac{d\mathbf{I}_k}{dt} \qquad \ldots (4.171)$$

Budući da je $\mathbf{I}_k = I_k \sqrt{2} \sin \omega t$, dobivamo

$$\frac{d\mathbf{V}_{p2}}{dt} = Z\,\omega \sqrt{2}\, I_k \cos \omega t \qquad \ldots (4.172)$$

a kako nas interesira porast u trenutku prolaza struje kroz nulu ($t = 0$), brzina porasta prekidnog napona iznosi

$$\Delta v_{p2} = Z\,\omega \sqrt{2}\, I_k \qquad \ldots (4.173)$$

gdje je I_k efektivna vrijednost struje kratkog spoja. Valni otpor voda je

$$Z = \sqrt{\frac{L_{v1}}{C_{v1}}} \qquad \ldots (4.174)$$

gdje su L_{v1} i C_{v1} induktivitet, odnosno kapacitet voda po jedinici duljine. Ako brojnik i nazivnik pomnožimo sa L_{v1}, dobit ćemo

$$Z = \frac{L_{v1}}{\sqrt{L_{v1} C_{v1}}} \qquad \ldots (4.175)$$

pa uvrštavanjem u (4.173) imamo

$$\Delta v_{p2} = c\, X_{v1} \sqrt{2}\, I_k \qquad \ldots (4.176)$$

gdje su $c = 1/\sqrt{L_{v1} C_{v1}}$ brzina širenja vala u vodu, a $X_{v1} = \omega L_{v1}$ reaktancija voda po jedinici duljine.

Isto razmatranje možemo provesti za kontakt 1 promatrane sklopke. Ako pretpostavimo da se sabirnice na koje je neposredno priključena sklopka S napajaju preko n vodova, bilo bi potrebno narinuti n puta niži napon da bi se spriječilo dalje protjecanje struje kratkog spoja nakon njezina prolaza kroz nulu, a uz pretpostavku da su svi vodovi jednaki. Uz istu pretpostavku jeste brzina porasta prekidnog napona

$$\Delta v_{p1} = \frac{c\, X_{v1} \sqrt{2}\, I_k}{n} \qquad \ldots (4.177)$$

pa tu veličinu možemo zanemariti u daljnjim razmatranjima, jer iznosi za mjesta s velikom rasklopnom snagom (mnogo vodova) oko 10% veličine Δv_{p2} (Lit. 72).

Tjemena vrijednost prekidnog napona jednaka je dvostrukoj tjemenoj vrijednosti napona frekvencije 50 Hz na mjestu sklopke. Tjemena vrijednost napona osnovne frekvencije jednaka je padu napona od mjesta kvara do sklopke, pa je prekidni napon

$$V_p = 2 \sqrt{2}\, l\, X_{v1} I_k \qquad \ldots (4.178)$$

Do dvostruke vrijednosti dolazimo iz (4.163) ako zanemarimo prigušenje i postavimo $\omega_p t = \pi$. U (4.178) l je udaljenost kvara od sklopke.

Prema (4.176) i (4.178) možemo zaključiti: a) brzina porasta i tjemena vrijednost prekidnog napona proporcionalne su struji kratkog spoja; b) brzina porasta prekidnog napona opada s povećanjem napona mreže, jer je tada, uz ostale nepromijenjene odnose (generatori u pogonu, konfiguracija mreže) i struja kratkog spoja manja (do takvog zaključka dolazimo i na osnovu sl. 4.83, jer je brzina porasta napona proporcionalna s frekvencijom povratnog napona) i c) brzina porasta i tjemena vrijednost napona manje su za kabelske mreže, jer su za kabel i brzina širenja vala ($c \cong 150000$ km/s, dok je za zračni vod $c \cong 300000$ km/s) i reaktancije (X_{v1}) po jedinici duljine manje nego za zračni vod, pa je faktor naprezanja sklopke manji.

U trofaznim mrežama brzina porasta i tjemena vrijednost povratnog napona ovise o vrsti kratkog spoja i o načinu uzemljenja nul-tačke (Lit. 72), pa se kao srednje vrijednosti mogu postaviti

$$\Delta v_p = 0{,}25\, I_k \qquad \dots (4.179)$$

$$V_p = 1{,}7\, l\, I_k \qquad \dots (4.180)$$

Iz navedenih relacija Δv_p dobivamo u kV/μs, ako I_k uvrstimo u kA, dok V_p dobivamo u kV, ako l uvrstimo u km, a I_k u kA.

Na osnovu relacija (4.179) i (4.180) možemo zaključiti

a) pri kratkom spoju neposredno uz sklopku struja kratkog spoja, a prema tome i brzina porasta prekidnog napona, bit će velike, dok će tjemena vrijednost prekidnog napona biti vrlo malena ($l \cong 0$), pa će tada i faktor naprezanja sklopke (4.169) biti malen;

b) ako kratki spoj nastane daleko od sklopke bit će l veliko, ali će struja kratkog spoja postati manja (radi veće reaktancije), a time i brzina porasta napona;

c) maksimalno naprezanje sklopke pojavit će se pri kratkom spoju na maloj udaljenosti od sklopke, jer će tada i struja kratkog spoja i brzina porasta napona biti skoro isto tako velike kao u slučaju kratkog spoja neposredno uz sklopku, dok će tjemena vrijednost napona postati dosta velika (utjecaj duljine l). Može se dogoditi da sklopka neće moći prekinuti struju kratkog spoja i pored toga što ima dovoljnu rasklopnu snagu za isklapanje kratkog spoja neposredno na mjestu ugradnje.

Do gornjih zaključaka dolazimo ako odredimo faktor naprezanja sklopke (4.169) pomoću (4.179) i (4.180). Struju kratkog spoja možemo prikazati relacijom

$$I_k = \frac{V}{X_m + l\, X_{v1}} \qquad \dots (4.181)$$

gdje je X_m reaktancija mreže do sabirnica na koje je priključena promatrana sklopka. Uzmemo li u obzir spomenute relacije, dobivamo za faktor naprezanja sklopke

$$F_K = 0{,}425\, l\, I_k^3 =$$

$$= 0{,}425 \left(\frac{V}{X_{v1}}\right)^3 \frac{l}{\left(\frac{X_m}{X_{v1}} + l\right)^3} \qquad \dots (4.182)$$

Deriviranjem F_K po l i izjednačenjem s nulom dobivamo da se maksimalni faktor naprezanja sklopke pojavljuje kada kratki spoj nastane na udaljenosti od

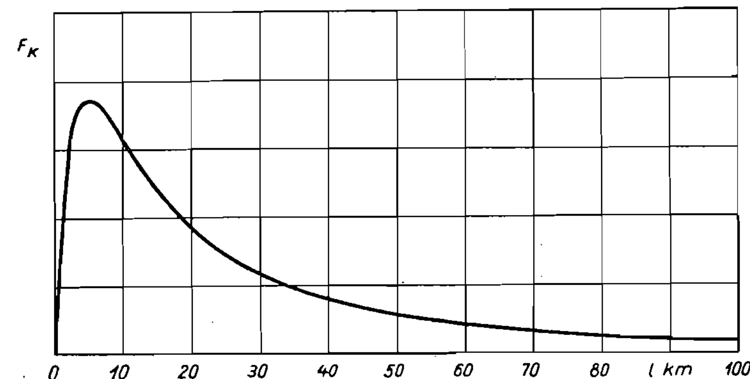
$$l_{max} = \frac{1}{2}\frac{X_m}{X_{v1}} \text{ km} \qquad \dots (4.183)$$

odnosno uzevši u obzir da je $X_{v1} \cong 0{,}4\ \Omega$/km, na udaljenosti

$$l_{max} = 1{,}25\, X_m \text{ km} \qquad \dots (4.185)$$

Na sl. 4.87. prikazana je ovisnost faktora naprezanja sklopke o udaljenosti l za $X_m/X_{v1} = 10$.

Iz relacije (4.185) dolazimo također do l_{max} u ovisnosti o rasklopnoj snazi pri kratkom spoju na sabirnicama. Množenjem i dijeljenjem s kva-



Slika 4.87. Primjer ovisnosti faktora naprezanja sklopke o udaljenosti kratkog spoja od sklopke

dratom linijskog napona (U_n^2), te uzimajući u obzir da je rasklopna snaga tropolnog kratkog spoja na sabirnicama $S_{k3} = U_n^2/X_m$, iz (4.185) dobivamo

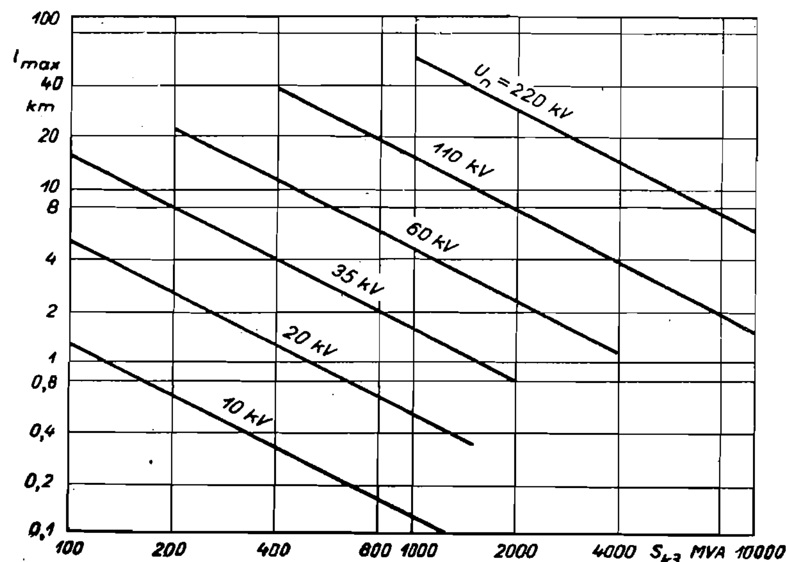
$$l_{max} = 1{,}25\, \frac{U_n^2}{S_{k3}} \qquad \dots (4.186)$$

Na sl. 4.88. prikazana je ovisnost l_{max} o S_{k3} za različite nazivne napone mreže.

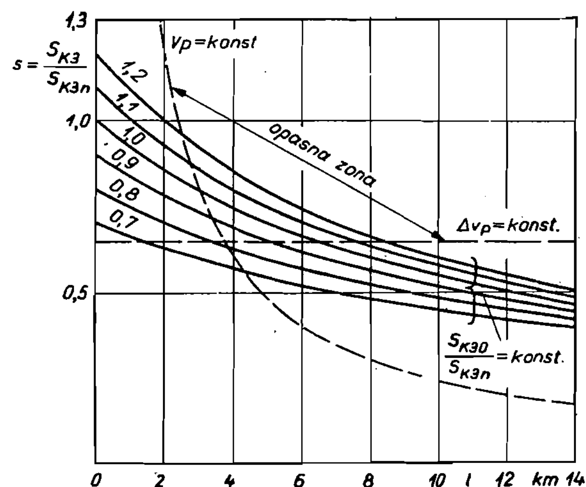
Pogledajmo još kako se mijenja opasna zona za sklopku (zona u kojoj se pojavljuje faktor naprezanja sklopke, koji ne može savladati sklopka) u ovisnosti o rasklopnoj snazi na mjestu ugradnje sklopke (S_{k3o}). Ako sa S_{k3n} označimo nazivnu rasklopnu snagu sklopke, omjer između stvarne rasklopne snage S_{k3} u ovisnosti o mjestu kratkog spoja (u ovisnosti o udaljenosti l) i nazivne rasklopne snage sklopke možemo odrediti iz relacije

$$\frac{S_{k3}}{S_{k3n}} = \frac{S_{k3o}}{S_{k3n}} \frac{1}{1 + l\,\frac{X_{v1}}{U_n^2}\, S_{k3o}} \qquad \dots (4.187)$$

Na sl. 4.89. prikazana je ovisnost omjera (4.187) o l za različite vrijednosti S_{k3o}/S_{k3n}. Za donju granicu opasne zone može se — kao prva aproksimacija (Lit. 72) — uzeti samo tjemena vrijednost prekidnog napona. Ako dakle postavimo V_p = konst (odabirući za V_p onu vrijednost koju sklopka može podnijeti), u koordinatnom sistemu duljine l i struje kratkog spoja I_k dobit ćemo hiperbolu iz (4.180) (krivulje V_p = konst na sl. 4.89). Na ordinati diagrama na sl. 4.89. imamo struje kratkog spoja u već spomenutom mjerilu. Pri većoj tjemenoj vrijednosti napona sklopka ne bi mogla prekinuti struju, pa područje desno od krivulje V_p = konst predstavlja opasnu zonu. Za gornju granicu (s obzirom na udaljenost od sklopke) može se uzeti samo brzina porasta napona Δv_p. Ako u (4.179)



Slika 4.88. Ovisnost l_{max} (4.186) o rasklopnoj snazi na mjestu ugradnje sklopke (S_{k3}) i nazivnog napona mreže (U_n)



Slika 4.89. Opasna zona u ovisnosti o rasklopnoj snazi na mjestu sklopke (S_{k3o}) i o udaljenosti mjesta kratkog spoja

uvrstimo za Δv_p onu brzinu porasta napona koju može podnijeti sklopka (Δv_p = konst), dobit ćemo u dijagramu na sl. 4.89. horizontalan pravac (I_k = konst). Područje iznad pravca Δv_p = konst ima veću brzinu porasta

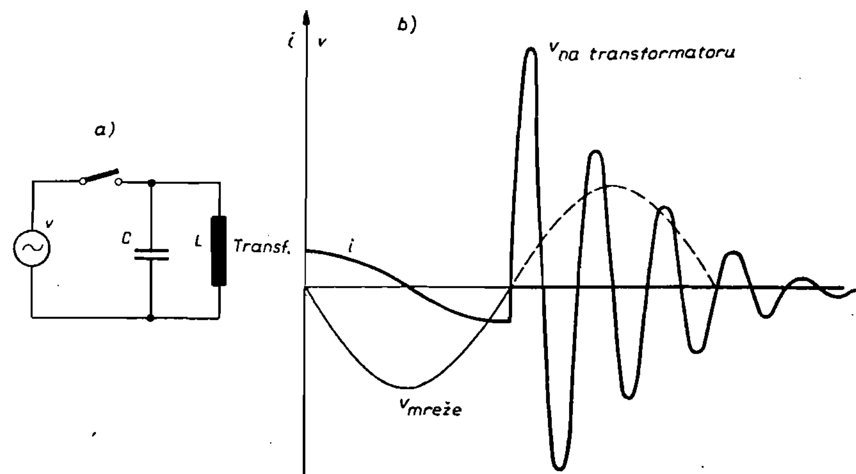
napona, pa s obzirom na tu veličinu predstavlja opasnu zonu. Prema tome opasnu zonu imamo u području iznad i desno od V_p = konst., i iznad Δv_p = konst. Promatrajući, dakle, prilike uz određenu rasklopnu snagu na mjestu ugradnje sklopke (S_{k3o}/S_{k3n} = konst), moći ćemo konstatirati da je duljina opasne zone to veća što je veća rasklopna snaga na mjestu ugradnje sklopke, pa je radi toga i veća vjerojatnost da sklopka zakaže, jer je vjerojatnost kvara po jedinici duljine voda konstantna. Osim toga se pokazuje da je povoljno odabrati sklopku nešto veće rasklopne snage od one koja bi bila potrebna s obzirom na rasklopnu snagu u slučaju kratkog spoja na mjestu ugradnje sklopke.

e) Isklapanje malih induktivnih i kapacitivnih struja

Prilikom prekidanja struje magnetiziranja, odnosno isklapanja transformatora u praznom hodu, pojavljuju se veliki prenaponi radi prekida struje prije njenog prirodnog prolaza kroz nulu (sl. 4.90). To je posljedica male struje, koja omogućuje brz porast otpora luka i pored toga što luk još gori. Gašenjem luka prije nego što je struja postigla vrijednost nula ostaje u transformatoru akumulirana energija $\frac{1}{2} L i^2$, gdje je i struja koja je tekla neposredno prije gašenja luka. Ta energija mora se utrošiti u titrajnom krugu transformator-kapacitet (sl. 4.90a), pa treba da bude zadovoljena jednadžba

$$\frac{1}{2} L i^2 = \frac{1}{2} C V^2 \qquad \ldots (4.188)$$

gdje je C kapacitet kruga, a V napon na kapacitetu. Budući da je kapacitet transformatora malen, mora napon postati velik (sl. 4.90b), pa se

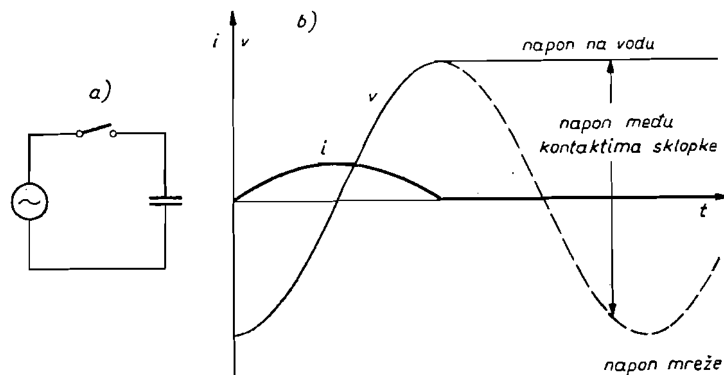


Slika 4.90. Nadoknadna shema isklapanja transformatora u praznom hodu (a), te promjena struje i napona prije i nakon gašenja luka u sklopki (b)

radi toga pojavljuju veliki prenaponi u slučaju isklapanja neopterećenog transformatora.

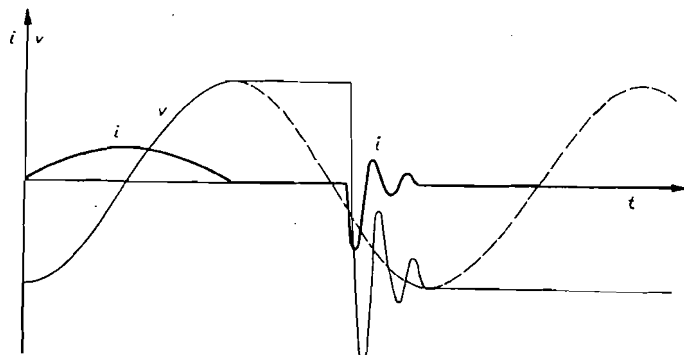
Zbog toga je povoljno — ako se radi o transformatoru koji dobiva napon s obje strane (transformator koji spaja dva dijela mreže s elektranama) — najprije isklopiti njegovu sklopku na strani višeg napona, a tek onda onu na strani nižeg napona, kako bi se prekidala veća struja.

Do znatnih prenapona može doći pri isklapanju voda u praznom hodu, odnosno pri prekidanju kapacitivne struje. Ugasi li se konačno luk nakon prolaza struje kroz nulu, na kapacitetu će ostati napon jednak naponu u trenutku gašenja (sl. 4.91). Taj napon vlada na kontaktu sklopke na strani



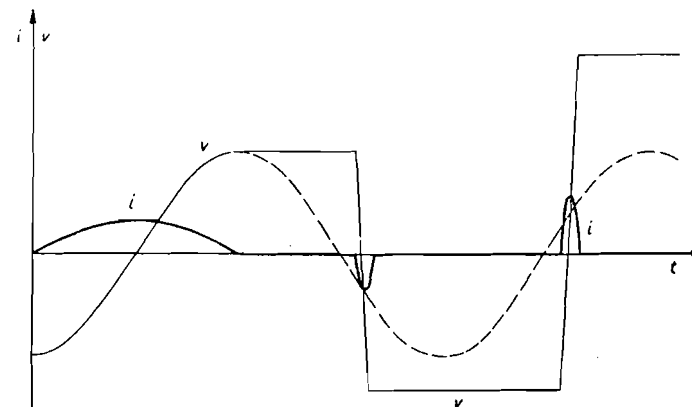
Slika 4.91. Isklapanje voda u praznom hodu: (a) nadoknadna shema spoja, (b) promjena struje i napona prije i nakon gašenja luka

voda. Napon mreže mijenja se i dalje, pa će među kontaktima sklopke u najnepovoljnijem slučaju vladati dvostruka tjemena vrijednost napona mreže. Ako je, međutim, električna čvrstoća među kontaktima dovoljno porasla, neće doći do ponovog paljenja luka. Ukoliko nije postignuta dovoljna čvrstoća, upalit će se luk ponovo. Ako je vod kratak, odnosno ako je kapacitet malen, luk se neće ugasiti nakon prvog prolaza kroz nulu



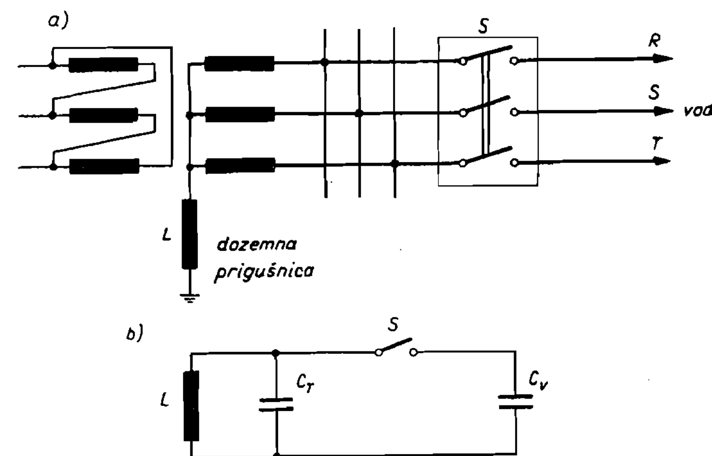
Slika 4.92. Promjena struje i napona za vrijeme isklapanja kratkog neopterećenog voda

(sl. 4.92), nego tek onda kad napon postigne vrijednost napona mreže. U slučaju isklapanja dugog voda, nasuprot tome, luk će se ugasiti nakon prvog prolaza kroz nulu (sl. 4.93), pa će na vodu ostajati sve veći napon. Ako ne bi postojali odvodnici prenapona na vodu, moglo bi doći do proboja izolacije voda. Radi toga sklopke koje treba da prekinu kapacitivnu struju moraju prekidanje izvršiti u vrlo kratkom vremenu i biti sposobne da spriječe ponovo paljenje luka.



Slika 4.93. Promjena struje i napona za vrijeme isklapanja dugog neopterećenog voda

Do slične situacije kao pri isklapanju neopterećenog transformatora dolazi prilikom isklapanja voda koji je priključen na rasklopno postrojenje u kojemu postoji dozemna prigušnica (Petersenova prigušnica, sl. 4.94). Isklapanjem sklopke S neće se prekinuti struja u sve tri faze isto-



Slika 4.94. Shema spoja i ekvivalentna shema isklapanja rasklopnog postrojenja s prigušnicom

dobno, pa će npr. u fazi T teći struja i nakon što su lukovi pogašeni u ostalim polovima sklopke. Tada se strujni krug može prikazati nadoknaddom shemom sa sl. 4.94b. Radi male struje doći će do njena prekida prije prirodnog prolaza kroz nulu. Energija u magnetskom polju prigušnice utrošit će se u krugu L-C_T, jer je sklopka isklopljena i u krugu nema kapaciteta C_V. Zbog malog kapaciteta C_T (kapacitet transformatora i sabirnica) napon u krugu L-C_T bit će visok prema (4.188). To vrijedi međutim onda, ako je vod koji se isklapa posljednji od postojećih vodova ili ako je on jedini. U protivnom slučaju kapacitetu C_T treba dodati kapacitet ostalih vodova, pa će napon biti znatno manji.

f) Izvedbe sklopki

Prema izvedbi razlikujemo slijedeće tipove sklopki: zračna sklopka, sklopka s magnetskim djelovanjem, uljna sklopka, malouljna sklopka, hidromatska (ekspanziona) sklopka i pneumatska sklopka. U njima se koristi jedno ili istodobno više sredstava za gašenje luka. To su: povećanje razmaka među kontaktima, intenzivno produljenje luka djelovanjem magnetskog polja, strujanje plinova i tekućina uzdužno ili poprečno na luk, bilo da je strujanje posljedica djelovanja samog luka, bilo da se to ostvaruje pomoću neovisnog izvora energije, dodir luka s dielektrikom u uskim rasporima, podjela luka na više kratkih lukova. S obzirom na medij koji sudjeluje u gašenju luka, razlikujemo sklopke s plinovitim (zrak, komprimirani zrak) i tekućim (ulje, voda) medijem. Radi visokih temperatura za vrijeme postojanja luka u sklopki, svi mediji sudjeluju u gašenju kao plinovi ili pare, od kojih na gašenje najviše utječe vodik radi visoke toplinske vodljivosti i velikog pada napona po jedinici duljine luka. Vodik ima, naime, oko 17 puta veću vodljivost, a izaziva oko 13,5 puta veći pad napona nego zrak. Radi toga se i upotrebljavaju ulje i voda kao medij za gašenje luka.

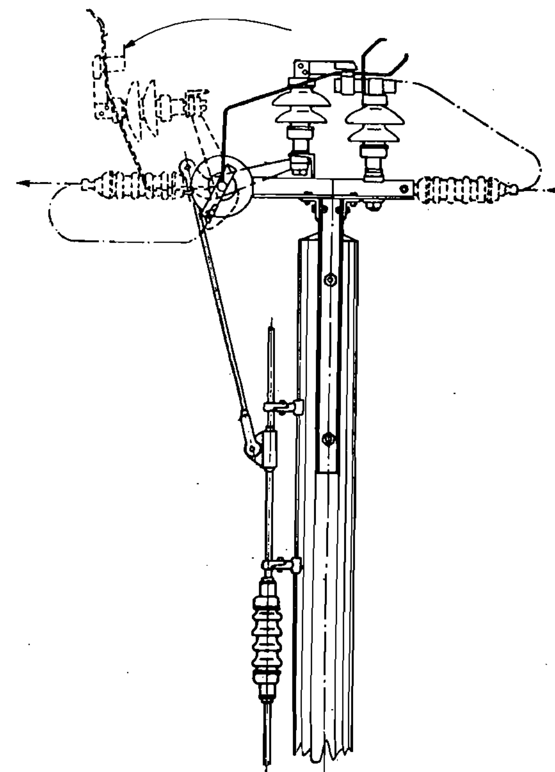
1) Zračne sklopke

Luk, koji gori u atmosferi, produljuje se i mijenja svoj položaj radi djelovanja magnetskog polja koje se stvara oko njega, i radi uzgona toplim zrakom koji se ugrijava lukom. Zbog toga su u zračnim sklopkama potrebni znatni razmaci između kontakata i uzemljenih dijelova, da ne bi za vrijeme trajanja luka došlo do kratkih spojeva bilo neposredno među fazama, bilo preko metalnih dijelova kućišta.

Radi toga se za visoke napone izvode zračne sklopke samo kao »rastavljači na stupu«, za napone 6 do najviše 30 kV. Gašenje luka vrši se produljenjem razmaka među rogovima (sl. 4.95). Rasklopna snaga takvih rastavljača na stupu vrlo je malena. Rasklopna struja ne smije biti veća (Lit. 56) od

$$I = \frac{60}{U} \text{ A} \qquad \dots (4.189)$$

gdje je U nazivni napon mreže u kV. Prema tome rastavljač na stupu može se upotrijebiti za prekidanje struja praznog hoda transformatora i za isklapanje neopterećenih vodova.



Slika 4.95. Rastavljač na stupu

2) Sklopke s magnetskim puhanjem

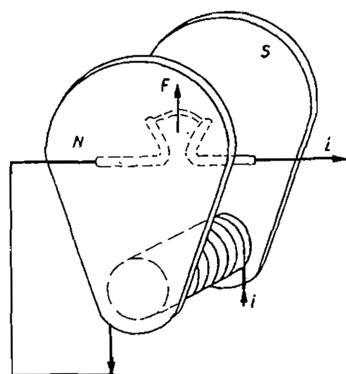
Ideju gašenja luka magnetskim puhanjem prikazuje sl. 4.96. Struja koju treba prekinuti protječe kroz svitak. Na taj način ta struja proizvodi magnetski tok koji se zatvara preko polova N-S, među kojima se nalaze kontakti sklopke. Magnetsko polje djeluje silom F na električni luk, te ga potiskuje na rogove kontakta i tako ga produljuje. Veća duljina luka izaziva pojačano hlađenje i deionizaciju. Vrlo važnu ulogu u ovom procesu treba pripisati brzom kretanju luka kroz miran zrak, što je analogno djelovanju »protuvjetra« na nepomičan luk.

Znatno poboljšanje se postiže ako se luk djelovanjem magnetskog polja dovede u uski raspor između ploča od izolacionog materijala (sl. 4.97). To poboljšanje posljedica je neposrednog dodira s hladnim izolacionim materijalom. S obzirom na vladanje luka, treba razlikovati široke i uske raspore. Uskim se smatra raspor čija je širina jednaka ili manja od promjera luka. Kad se luk nađe u uskom rasporu, promijenit će se njegov promjer. U širokom rasporu, nasuprot tome luk gori kao u slobod-

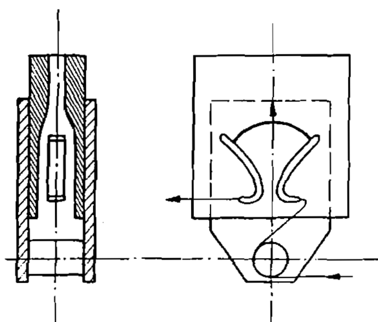
nom prostoru. Napon luka po jedinici duljine, koji gori u uskom rasporu, može se prikazati relacijom

$$u = u_s + 0{,}15 \sqrt[3]{\frac{v^2\, i}{\delta}}\ \text{V/cm} \qquad \ldots (4.190)$$

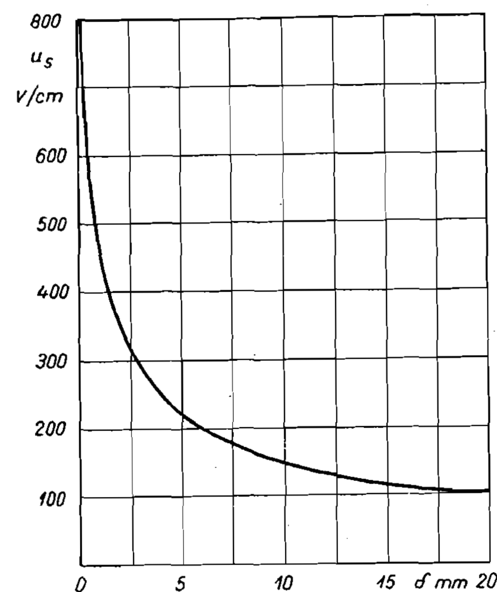
gdje su: u_s pad napona (V/cm) nepomičnog luka koji gori u uskom rasporu, v brzina luka u m/s, i struja luka u A, a δ širina raspora u m. Ovisnost veličine u_s o širini raspora prikazana je na sl. 4.98.



Slika 4.96. Princip djelovanja sklopke s magnetskim puhanjem

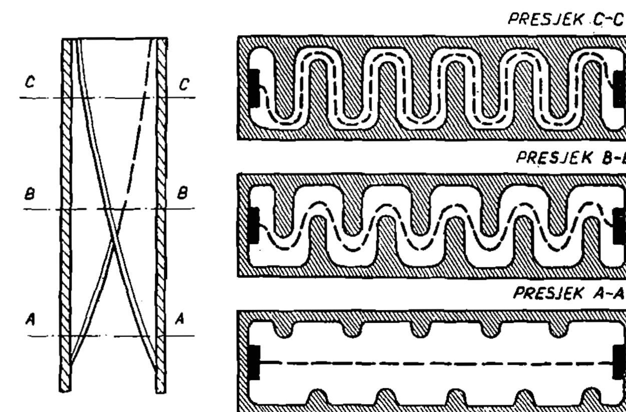


Slika 4.97. Princip sklopke s uskim rasporom



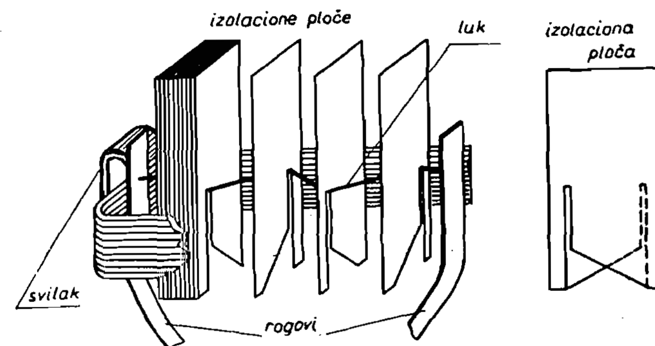
Slika 4.98. Ovisnost pada napona (u_s) po jedinici duljine nepomičnog luka o širini raspora

Dalje poboljšanje moguće je postići razbijanjem luka u više manjih lukova, koji gore u uskim rasporima, te produljenjem luka, što se postiže povoljnim konstruktivnim rješenjem.



Slika 4.99. Izvedba komore za gašenje luka produljenjem luka i suženjem raspora

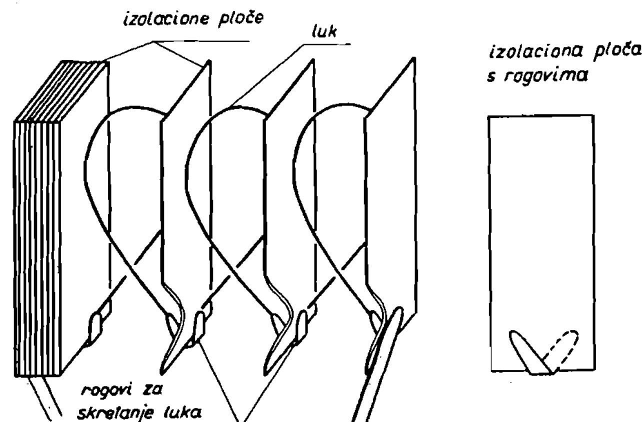
Na sl. 4.99. prikazana je izvedba komore za gašenje luka, u kojoj se luk što dulje traje, sve više produljuje i dolazi u sve uže raspore. Produljenje luka postiže se pogodnim rasporedom otvora na izolacionim pločama ili postavljanjem rogova na dno izolacionih ploča. Na sl. 4.100. prikazana



Slika 4.100. Skica sklopke s cik-cak rasporedom otvora na izolacionim pločama (razmak među pločama karikiran)

je skica konstrukcije sklopke sa cik-cak rasporedom otvora na izolacionim pločama, a na sl. 4.101. skica sklopke s rogovima, za skretanje luka među izolacionim pločama.

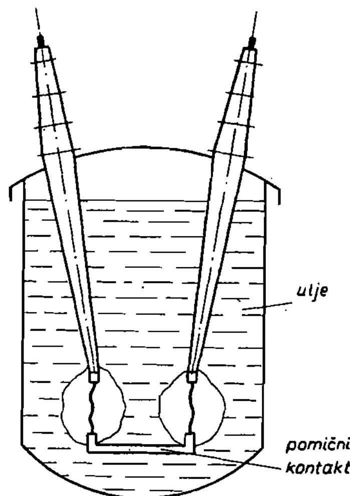
Sklopke s magnetskim puhanjem i uskim rasporima izvode se za napone do 24 kV i za rasklopne snage do 750 MVA.



Slika 4.101. Skica sklopke s rogovima za skretanje luka među izolacionim pločama

3) Uljne sklopke

Uljna sklopka najstariji je tip sklopke za visoki napon. Prekidanje struje vrši se među kontaktima u ulju (sl. 4.102). Kontakti triju polova smješteni su u zajednički kotao. Luk gori u prostoru ispunjenom uljnim parama i plinovima, na što se raspada ulje nakon isparavanja. Uljne pare

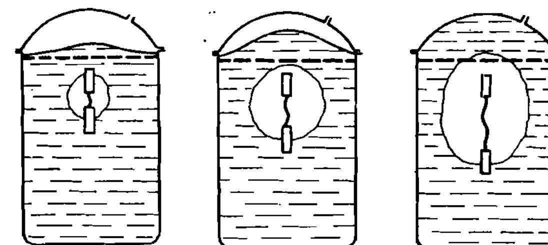


Slika 4.102. Princip djelovanja uljne sklopke (prikaz jednog pola)

potiskuju ulje i podižu mu nivo u sklopki (sl. 4.103). Povećanjem razmaka među kontaktima povećava se prostor ispunjen parama, što sve više podiže nivo ulja, uz istodobno strujanje zraka kroz otvor na poklopcu sklopke, koji se nalazi iznad razine ulja. Ako je rasklopna moć sklopke dovoljna,

luk se mora ugasiti prije nego što bi počelo ulje izlaziti kroz otvor na poklopcu. Povećanjem napona i rasklopne moći sklopke povećava se potreban volumen ulja, a time i volumen sklopke.

Za vrijeme gorenja luka naglo se širi prostor ispunjen uljnim parama i ulje udara u poklopac i stijenke kotla, što može — naročito ako su struje kratkog spoja velike — dovesti do oštećenja poklopca ili kotla, a to može izazvati eksploziju sklopke radi naglog isparenja ulja. Takva eksplozija dovodi do zapaljenja razljevenog i raspršenog ulja, a često i do potpunog uništenja postrojenja. Moguća je, osim toga, i tzv. sekundarna eksplozija uljne sklopke. Ona će nastati ako u slučaju stvaranja eksplozivne smjese plinova i zraka u sklopki iznad ulja dođe do iskrenja bilo radi preskoka izolatora bilo radi otvaranja kontakata.



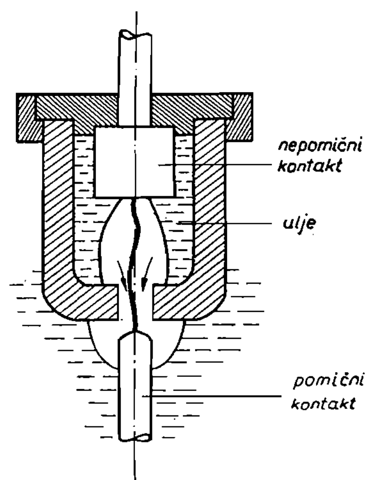
Slika 4.103. Prilike u uljnoj sklopki za vrijeme gorenja luka

Za više napone svaki pol uljne sklopke izvodi se u posebnom kotlu, da bi se spriječio kratak spoj među polovima unutar sklopke i da bi se smanjila količina ulja. No i pored toga za jedan pol sklopke 220 kV potrebno je oko 20 t ulja.

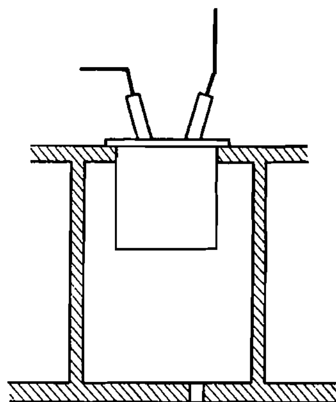
Glavna mana uljnih sklopki jest opasnost od eksplozije. Osim toga u ulju se stvara čađa kao posljedica gorenja luka, pa je potrebno redovito pročišćavanje ulja. Upotreba negorivih izolacionih tekućina (npr. kloriranog difenila) ne dolazi u obzir radi njihova raspadanja za vrijeme gašenja luka u agresivne kiseline, koje nagrizaju organske izolacione materijale i omogućuju stvaranje vodljivog sloja na porculanskim izolatorima.

Povećanje rasklopne moći uljne sklopke postiže se ugradnjom komore za gašenje na svaki pol sklopke (sl. 4.104), koja omogućuje intenzivno strujanje uljnih para uzduž luka. U trenutku otvaranja kontakta luk gori samo u komori za gašenje, u kojoj zbog toga poraste tlak. Daljnjim pomicanjem pomičnog kontakta oslobađa se otvor na komori za gašenje kroz koji struje uljne pare i na taj način pomažu deionizaciju. Djelovanje komore za gašenje jeste to jače, što je struja koju se prekida veća. Pri malim strujama uljna sklopka s komorom za gašenje djeluje kao obična uljna sklopka. Daljnja je prednost uljne sklopke s komorom za gašenje ta, što komora preuzima na sebe početno povišenje tlaka ulja, pa u znatnoj mjeri rasterećuje poklopac i stijenke sklopke.

Da se djelovanje eventualne eksplozije uljne sklopke ograniči na najmanji mogući dio rasklopnog postrojenja, potrebno ga je izvesti tako da kotao uljne sklopke bude zidom odvojen od ostalog postrojenja (sl. 4.105).



Slika 4.104. Komora za gašenje u uljnoj sklopki

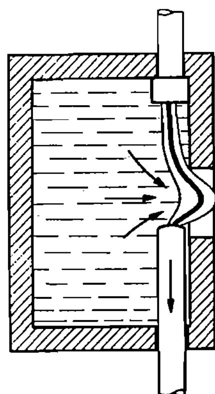


Slika 4.105. Smještaj uljne sklopke u rasklopnom postrojenju

Radi svih nabrojanih nedostataka danas se u većini zemalja ne proizvode uljne sklopke, iako još ima starih postrojenja s takvim sklopkama. Engleske i sjevernoameričke tvornice još i danas proizvode uljne sklopke i za vrlo visoke napone.

4) Malouljne sklopke

Da se izbjegnu opasnosti od eksplozije, a iskoriste dobra svojstva ulja kao medija za gašenje luka, konstruirane su tzv. malouljne sklopke, u kojima ulje ne služi za izolaciju među fazama i prema masi, već samo za

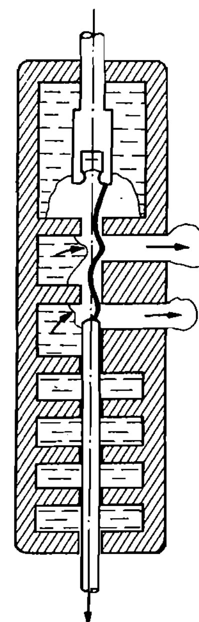


Slika 4.106. Princip djelovanja malouljne sklopke

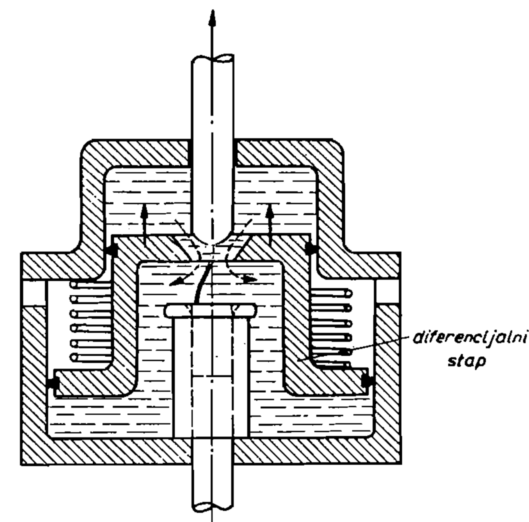
gašenje luka. Na taj način količina ulja iznosi tek mali dio količine koja je potrebna u uljnoj sklopki. Izolacija prema uzemljenim dijelovima i

među polovima tada je porculan ili neki drugi kruti izolacioni materijal. U svim malouljnim sklopkama djelovanjem luka i ulje i uljne pare dolaze pod tlak, i u pogodnom trenutku struje uzduž ili poprečno na luk produljujući ga, odvodeći ionizirane plinove i regenerirajući prostor među kontaktima. Princip rada malouljne sklopke prikazan je na sl. 4.106. Neposredno nakon otvaranja kontakata luk gori u zatvorenoj komori za gašenje luka, zbog isparavanja ulja u komori raste tlak, koji će dovesti do intenzivnog strujanja kroz otvor čim ga pomični kontakt oslobodi, jer tada zbog naglog sniženja tlaka dolazi i do naglog isparavanja ugrijana ulja.

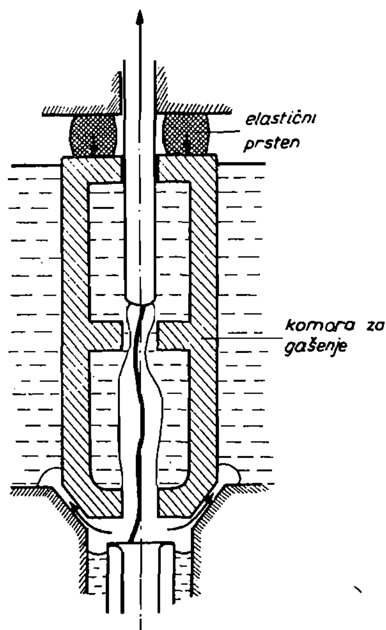
Postoji niz izvedaba malouljnih sklopki. U nekima je strujanje ulja i plinova pod tlakom ovisno samo o položaju pomičnog kontakta (sl. 4.107. i 4.108), dok je u drugima ovisno o tlaku u komori (sl. 4.109). Otvaranjem kontakta (sl. 4.107) najprije se oslobađaju otvori koji omogućuju strujanje poprečno na luk, a zatim oni koji dovode do uzdužnog strujanja. Povećani tlak u komori za gašenje s diferencijalnim stapom (sl. 4.108) podiže stap, radi čega se povisuje tlak u prostoru iznad stapa. To povišenje tlaka dovodi do strujanja ulja čim pomični kontakt oslobodi otvor na vrhu diferencijalnog stapa. Na sl. 4.109. prikazana je komora koja omogućuje strujanje kad tlak unutar komore poraste toliko da svlada silu elastičnog prstena koji pritiskuje komoru i zatvara otvore za strujanje.



Slika 4.107. Izvedba komore za gašenje malouljne sklopke s poprečnim i uzdužnim strujanjem



Slika 4.108. Izvedba komore za gašenje malouljne sklopke s diferencijalnim stapom



Slika 4.109. Izvedba malouljne sklopke s elastičnom komorom za gašenje

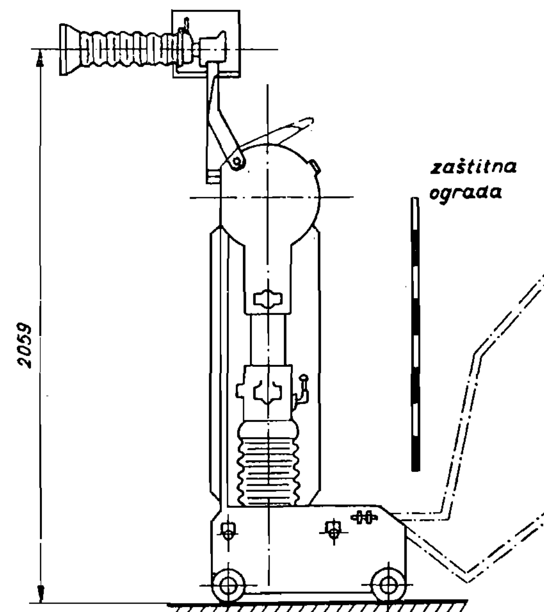
5) Hidromatske sklopke

Hidromatske sklopke u principu su malouljne sklopke s elastičnom komorom (sl. 4.109), u kojima je medij za gašenje luka voda mjesto ulja. Vodi se dodaje u malom postotku sredstvo za sprečavanje smrzavanja (glikol), koje osim toga povećava količinu para za vrijeme trajanja luka, što povoljno utječe na njegovo gašenje. Radi ograničene izolacione sposobnosti vode potrebno je na samoj sklopki predvidjeti dodatne noževe koji se otvaraju kad pomični kontakti sklopke dostignu krajnji položaj (sl. 4.110). Radi vodljivosti vode može prerano doći i do luka među kontaktima prilikom uklapanja. Ta je opasnost to veća, što je napon viši. Radi toga se hidromatske sklopke za napone iznad 10 kV izvode s posebnim uređajem za dovođenje vode u komoru samo za vrijeme isklapanja. U uklopljenom stanju pomični kontakt pritiskuje stap za dovođenje vode u komoru za gašenje (sl. 111a). Prilikom isklapanja pomični kontakt naglo kreće, a s njim i dotada pritisnuti stap, koji će ubaciti vodu u komoru za gašenje (sl. 111b).

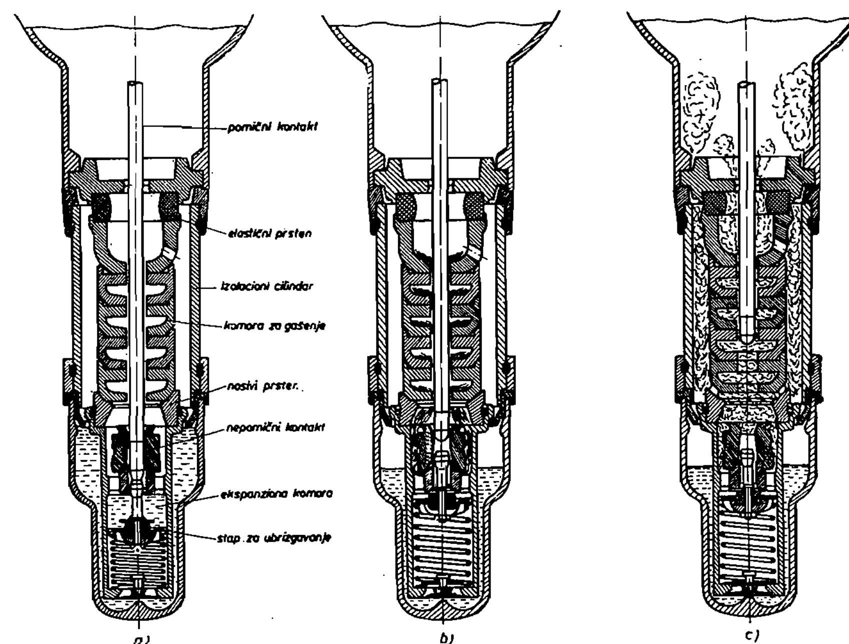
Hidromatske sklopke izvode se za napone do 60 kV.

6) Pneumatske sklopke

U pneumatskim sklopkama luk se gasi pomoću komprimiranog zraka, koji struji uzduž ili poprečno na luk. Komprimirani zrak proizvodi se u posebnom kompresorskom uređaju.

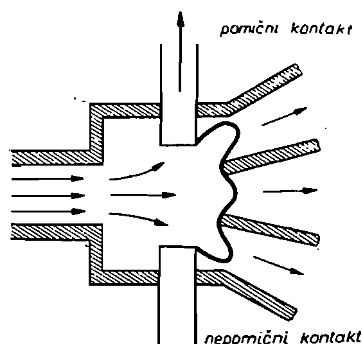


Slika 4.110. Vanjski izgled hidromatske sklopke

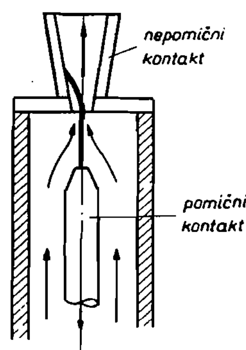


Slika 4.111. Djelovanje stapa za dovođenje vode u komoru za gašenje za vrijeme isklapanja hidromatske sklopke

Na sl. 4.112. prikazana je komora za gašenje luka komprimiranim zrakom, u kojoj zrak struji okomito na luk, a na sl. 4.113. komora u kojoj zrak struji uzduž luka. Otvaranjem pomičnog kontakta (sl. 4.112) zrak struji na mjesto luka, produljuje luk i nakon prolaza struje kroz nulu u cijelom prostoru među kontaktima uspostavlja se ista probojna čvrstoća. Radi toga se komore s takvim strujanjem zraka često upotrebljavaju za sklopke do 15 kV, ali je njihova upotreba za više napone nepogodna radi velikog potroška zraka i poteškoća pri ostvarenju dovoljnih razmaka među kontaktima. Izvedba prema sl. 4.113. upotrebljavana je u početku

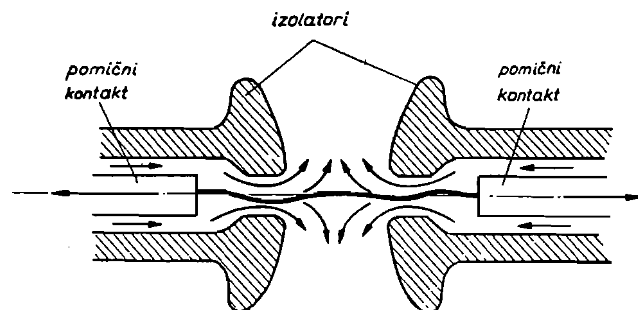


Slika 4.112. Skica komore za gašenje luka komprimiranim zrakom u kojoj zrak struji okomito na luk



Slika 4.113. Skica komore za gašenje luka komprimiranim zrakom, u kojoj zrak struji uzduž luka

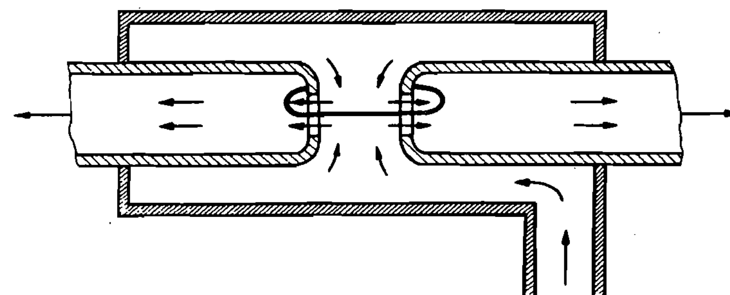
razvoja pneumatskih sklopki, no kasnije se prešlo na izvedbu prikazanu na sl. 4.114. U toj izvedbi luk neposredno nakon otvaranja kontakata gori u komprimiranom zraku, ali poteškoće brtvenja ograničuju tlak na 14 do 15 at. Povećanjem brzine kontakata smanjuje se trajanje luka, što se postiže povećanjem broja komora za gašenje, spojenih u seriju, što se normalno upotrebljava za više napone (60 kV i više).



Slika 4.114. Skica komore za gašenje luka komprimiranim zrakom s dva pomična kontakta i gorenjem luka u atmosferi

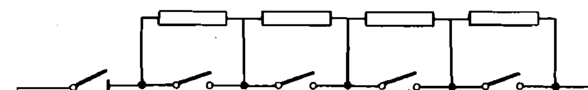
g) Višestruko prekidanje strujnog kruga

Za gašenje luka potrebno je, osim intenzivnog hlađenja, i što brže produljenje luka, a što se postiže što bržim pomakom kontakata. Brzina pomaka treba da bude to veća, što je veći povratni napon i što je veći nazivni napon sklopke. Brzina pomaka ograničena je tromošću pomičnog kontakta, ali se brzina povećanja razmaka među kontaktima može postići višestrukim prekidanjem, pri čemu se prekidna mjesta spajaju u seriju.



Slika 4.115. Skica komore za gašenje luka komprimiranim zrakom s dva pomična kontakta

Na taj način brzina produljenja luka postaje onoliko puta veća od brzine pomaka kontakata, koliko ima prekidnih mjesta. Maksimalna rasklopna moć sklopke s višestrukim prekidanjem postiže se samo onda, ako se povratni napon jednoliko podijeli među sva kontaktna mjesta. To se postiže postavljanjem kapaciteta ili visokoomskih djelatnih otpora paralelno prekidnim mjestima (sl. 4.116). Da bi se prekinuo ostatak struje koja



Slika 4.116. Shema spoja visokonaponskih djelatnih otpora u sklopci s višestrukim prekidanjem

nakon gašenja luka teče kroz otpore, potreban je u seriju spojeni rastavljač koji će se otvoriti neposredno nakon gašenja luka.

h) Karakteristika sklopaka

Pored nazivnog napona i nazivne struje, nazivna rasklopna moć glavna je karakteristika sklopke. Rasklopna moć tropolne sklopke definirana je kao zbroj rasklopnih moći triju polova. Budući da su polovi međusobno jednaki, rasklopna moć sklopke određena je relacijom

$$S = \sqrt{3}\, U_p I_r \qquad \dots (4.191)$$

gdje su U_p linijski napon mreže na mjestu ugradnje sklopke, a I_r efektivna vrijednost struje u trenutku otvaranja kontakta. Veličina struje I_r određuje se prilikom ispitivanja sklopke iz oscilograma struje (sl. 4.117).

U trenutku otvaranja kontakta izmjenična komponenta ima tjemenu vrijednost I_s, a istosmjerna vrijednost I_a. Efektivna vrijednost struje iznosi

$$I_r = \sqrt{I_s^2 + I_a^2} \qquad \ldots (4.192)$$

Linijski napon U_p dobivamo iz pretpostavke da je prekidni napon jednak faznom naponu.

Nazivne rasklopne moći sklopaka normirane su. U tab. 4.15. navedene su DIN-norme, a u tab. 4.16. IEC-preporuke za visokonaponske sklopke.

Sklopka rađena za viši napon može se upotrijebiti u mreži nižeg napona, ali pri tome treba uzeti u obzir smanjenje njezine rasklopne moći. U protivnom slučaju uz smanjenje napona, a uz nepromijenjenu rasklopnu moć, povećala bi se struja koju sklopka ne bi mogla prekinuti. Unutar najvišeg (U_g) i najnižeg napona (U_d) sklopka ima nazivnu rasklopnu moć uz povećanje rasklopne struje sa smanjenjem napona (sl. 4.118). Pri manjim naponima rasklopna moć sklopke smanjuje se proporcionalno s naponom, jer sklopka nije sposobna da prekine veću struju.

Sklopka mora da ima nazivnu rasklopnu moć za svaki induktivni faktor snage između 0,15 i 1,0. Osim toga sklopka mora biti sposobna da pri

TABLICA 4.15.

Njemačke norme za sklopke (DIN 43610, iz VIII. 1951 godine)

Nazivni napon kV	Dopuštene granice napona kV	Nazivna rasklop. snaga MVA	Nazivna struja A					
10	8 . . . 11,5	100	400	—	—	—	—	—
		200	400	600	1000	—	—	—
		400	—	—	1000	—	—	—
		600	—	—	1000	2000	4000	6000
		1000	—	—	1000	2000	4000	—
20	14 . . . 23	100	400	—	—	—	—	—
		200	400	600	—	—	—	—
		400	—	600	1000	—	—	—
		600	—	600	1000	—	—	—
		1000	—	—	1000	2000	—	—
30	24 . . . 35	200	400	600	—	—	—	—
		400	—	600	1000	—	—	—
		600	—	600	1000	—	—	—
		1000	—	—	1000	2000	—	—
60	45 . . . 69	600	—	600	—	—	—	—
		1000	—	600	—	—	—	—
110	95 . . . 127	1500	—	600	—	—	—	—
		2000	—	600	—	—	—	—
150	130 . . . 173	1500	—	600	—	—	—	—
		2500	—	600	—	—	—	—
220	190 . . . 253	2500	—	600	—	—	—	—
		4000	—	600	—	—	—	—

TABLICA 4.16.

Preporuka IEC za normiranje sklopaka (iz 1957. godine)

Nazivni napon kV	Nazivna rasklopna snaga MVA	Nazivna struja A								
6	100	400	—	—	—	—	—	—	—	—
	150	—	630	—	—	—	—	—	—	—
	250	—	630	—	1250	—	—	—	—	—
	350	—	630	—	1250	1600	—	—	—	—
	500	—	—	—	1250	1600	—	2500	4000	—
10	150	400	—	—	—	—	—	—	—	—
	250	—	630	—	—	—	—	—	—	—
	350	—	630	—	1250	1600	—	—	—	—
	500	—	630	—	1250	1600	—	—	—	—
	750	—	—	—	1250	1600	—	2500	4000	—
	1000	—	—	—	1250	—	—	2500	4000	6300
20	250	400	630	—	—	—	—	—	—	—
	350	—	630	—	—	—	—	—	—	—
	500	—	630	—	1250	—	—	—	—	—
	1000	—	—	—	1250	—	—	—	—	—
30	500	—	630	—	—	—	—	—	—	—
	750	—	—	—	1250	—	—	—	—	—
	1000	—	—	—	1250	—	—	2500	—	—
	1500	—	—	—	1250	—	—	2500	—	—
60	1000	—	630	—	—	—	—	—	—	—
	1500	—	630	—	1250	—	—	—	—	—
110	2500	—	—	800	—	—	—	—	—	—
	3500	—	—	—	1250	—	—	—	—	—
	5000	—	—	—	—	1600	—	—	—	—
	7500	—	—	—	—	1600	—	—	—	—
150	3500	—	—	800	—	—	—	—	—	—
	5000	—	—	—	1250	—	—	—	—	—
220	5000	—	—	800	—	—	—	—	—	—
	7500	—	—	—	—	1600	—	—	—	—
	10000	—	—	—	—	1600	—	—	—	—
380	15000	—	—	—	—	—	2000	—	—	—

nazivnom naponu uklopi nazivnu uklopnu struju, koja je jednaka $1{,}8\sqrt{2}$-strukoj nazivnoj rasklopnoj struji.

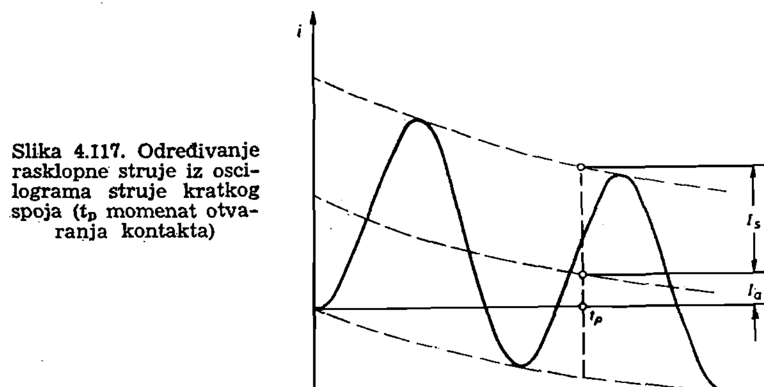
Sklopke upotrebljene za brzo ponovo uklapanje moraju biti sposobne da nakon prekidanja i ponovog uklapanja isklope struju koja odgovara nazivnoj rasklopnoj moći sklopke.

Budući da je mogućnost gašenja luka ovisna o vlastitoj frekvenciji, o njoj je ovisna i rasklopna moć sklopke. Ako je sklopka građena i ispitana za rasklopnu moć S_0 uz faktor amplitude γ_0 (4.166) i vlastitu frekvenciju

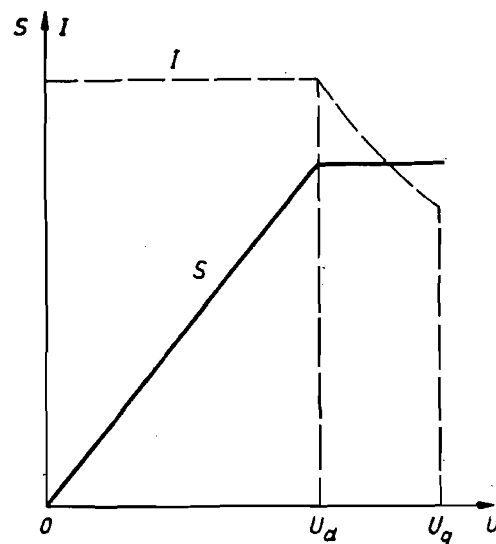
mreže f_{po}, njezina rasklopna moć, uz drugi faktor amplitude (γ) i drugu vlastitu frekvenciju (f_p), određuje se iz relacije

$$S = \frac{\gamma_o}{\gamma} \frac{1 + \frac{a}{f_p}}{1 + \frac{a}{f_{po}}} S_o \qquad \ldots (4.193)$$

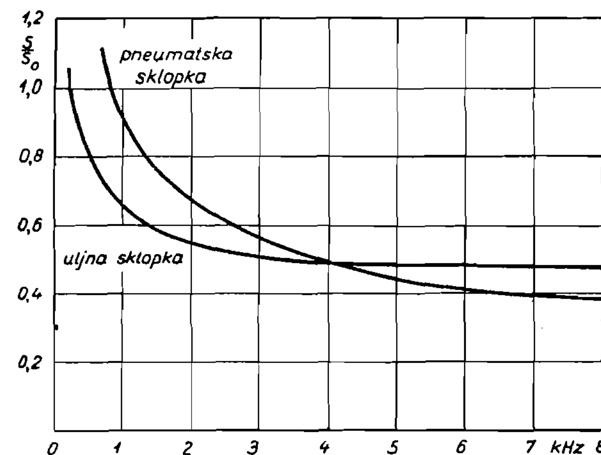
gdje je a konstanta ovisna o upotrebljenom mediju za gašenje luka (za komprimirani zrak $a \cong 2{,}7$ kHz, a za ulje $a \cong 170$ kHz). Primjer ovisnosti rasklopne moći sklopke o vlastitoj frekvenciji mreže prikazan je na sl. 4.119.



Slika 4.117. Određivanje rasklopne struje iz oscilograma struje kratkog spoja (t_p momenat otvaranja kontakta)

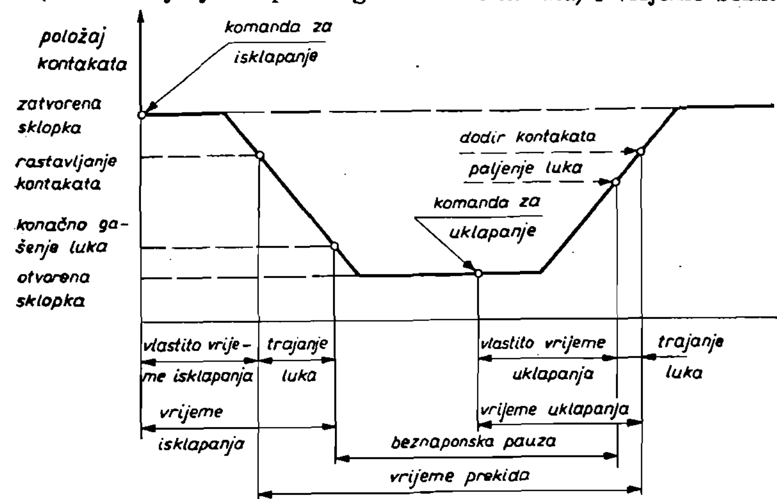


Slika 4.118. Ovisnost rasklopne moći (S) i rasklopne struje (I) o naponu mreže



Slika 4.119. Primjer ovisnosti rasklopne moći sklopke o vlastitoj frekvenciji mreže (Lit. 73)

Da bismo definirali vremena koja karakteriziraju rad sklopke, poslužimo se dijagramom sa sl. 4.120. Vrijeme isklapanja možemo podijeliti na vlastito vrijeme isklapanja i na trajanje luka. Računa se da isklapanje počinje od trenutka kad sklopka dobije komandu za isklapanje. Analogno vrijeme uklapanja možemo podijeliti na vlastito vrijeme uklapanja i na trajanje luka, koje je znatno kraće od trajanja luka za vrijeme isklapanja. Ako se radi o brzom ponovom uklapanju, treba razlikovati vrijeme prekida (od rastavljanja do ponovog dodira kontakata) i vrijeme beznapon-



Slika 4.120. Vremenski dijagram položaja kontakata sklopke za vrijeme isklapanja i ponovnog uklapanja

ske stanke (od gašenja luka do njegova ponovog paljenja). Kad se razmatraju sva tri pola sklopke, trajanje luka određuje se kao vrijeme od rastavljanja kontakata onog pola čiji se kontakti prvi rastavljaju, do gašenja luka onog pola na kojemu najdulje traje luk.

Sklopke za ponovo brzo uklapanje moraju, osim kratkog trajanja luka, imati i vrlo kratko vlastito vrijeme uklapanja, kako bi se beznaponska stanka mogla po potrebi skratiti i na 0,2 do 0,3 sekunde, da se spriječi ispadanje iz sinhronizma generatora koji su u pogonu u dva — radi isklopljene sklopke — odvojena dijela mreže, te da se spriječe štetne posljedice u potrošača, koje bi nastale radi predugog nestanka napona. Osim toga, u sklopkama za ponovo brzo uklapanje mora se ostvariti vrlo brzo regeneriranje prostora među kontaktima, da bi sklopka bila sposobna i nakon isklapanja najtežeg kratkog spoja, a zbog neuspjelog eliminiranja kratkog spoja u beznaponskoj stanci, ponovo prekinuti struju kratkog spoja koja će poteći kroz sklopku nakon ponovog uklapanja. Sklopke za ponovo brzo uklapanje u mrežama s neposredno uzemljenom nul-tačkom moraju još biti sposobne da odvojeno isklapaju i uklapaju pojedini pol.

i) Tendencija razvoja sklopaka

Potreba pojednostavnjenja i pojeftinjenja sklopaka dovela je do novih konstrukcija, koje su tek u početnoj fazi razvoja. Među takve nove konstrukcije spadaju sklopke s gašenjem luka u vakuumu i sklopke sa sumpornim heksafluoridom kao medijem za gašenje.

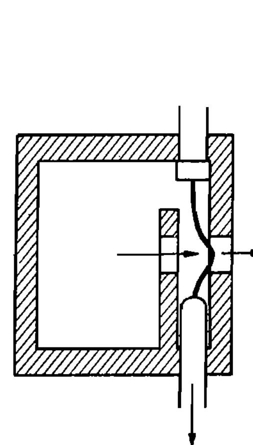
Ako luk, radi otvaranja kontakata, nastane u vakuumu, ispareni metal kontakata brzo će difundirati zbog velikog razmaka molekula koje još postoje u okolini kontakata. Radi toga će se luk vrlo brzo ugasiti, da bi se ponovo upalio zbog povratnog napona. Luk će se ponovo paliti sve dotle dok razmak među kontaktima ne bude toliki da povratni napon ne može ponovo uspostaviti luk među kontaktima. U takvoj sklopki luk se konačno gasi pri prolazu struje kroz nulu. Napon i energija luka znatno su manji nego u sklopkama drugih konstrukcija. Na razvoju sklopaka u vakuumu radi se u Vel. Britaniji, Sovjetskom Savezu i Sjedinjenim Američkim Državama. U Americi su u stalnom pogonu sklopke napona 33 kV, koje mogu prekinuti struju do 3000 A.

Plinovi, kao sumporni heksafluorid (SF_6) i freon (CCl_2F_2), imaju svojstvo da njihove neutralne molekule hvataju slobodne elektrone. Takvi negativni ioni imaju skoro istu brzinu kao i pozitivni ioni, pa se lako ponovo međusobno spajaju u neutralne molekule. Vjerojatnost tog ponovog spajanja znatno je veća nego spajanje brzih negativnih elektrona i mnogo polaganijih pozitivnih iona. To svojstvo lakog ponovog međusobnog spajanja dovodi do naglog smanjenja vodljivosti prostora među kontaktima i do brze regeneracije tog prostora nakon gašenja luka. Radi toga su potrebni manja količina i manji tlak SF_6 od količine i tlaka komprimiranog zraka za istu rasklopnu snagu. Da ne dođe do gubitka SF_6, sklopke se izvode sa zatvorenom komorom za gašenje. Američka tvornica Westinghouse izradila je sklopku sa SF_6 za 115 kV, 400 A i 1000 MVA, koja je u stalnom pogonu od 1955. godine. U Evropi tvornica ACEC (Belgija) proizvodi sklopke sa sumpornim heksafluoridom, za napone od 80 do 420 kV.

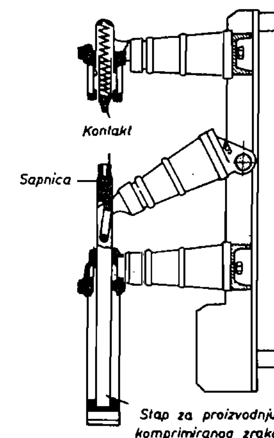
D. Učinski rastavljači

Učinski rastavljač je po svojem djelovanju sklopka, a po izvedbi — s obzirom na vidljivost kontakata — rastavljač.

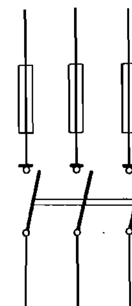
Za gašenje luka koriste se plinovi koji se razvijaju — prilikom isklapanja, a zbog djelovanja luka — u komori od aminoplasta, fibera, pleksistakla i sl. (sl. 4.121). Radi toga će u komori narasti tlak, koji će dovesti do strujanja plinova okomito na smjer luka, čim pomični kontakt oslobodi otvor komore.



Slika 4.121. Skica komore za gašenje luka učinskog rastavljača



Slika 4.122. Princip učinskog rastavljača s vlastitom proizvodnjom komprimiranog zraka



Slika 4.123. Shema spoja odvoda s visokonaponskim osiguračima i učinskim rastavljačem

Izvode se i takvi učinski rastavljači u kojih je komprimirani zrak medij za gašenje luka. Zrak se komprimira za vrijeme isklapanja učinskog rastavljača i struji kroz sapnicu na mjesto nastanka luka (sl. 4.122).

Rasklopna moć učinskih rastavljača ograničena je (nekoliko desetaka MVA), pa je i njihova upotreba za prekidanje struja kratkog spoja ograničena na mjesta na kojima rasklopna snaga ne prelazi rasklopnu moć takvih rastavljača.

Na mjestima gdje je rasklopna snaga veća, moguća je upotreba učinskih rastavljača u seriji s visokonaponskim osiguračima (sl. 4.123). U tom slučaju struju kratkog spoja prekida osigurač, a učinski rastavljač služi za prekidanje struje u normalnom pogonu. Ulogu sklopke u normalnom pogonu preuzima učinski rastavljač, a u slučaju kratkog spoja visokonaponski osigurač. Upotreba te kombinacije ograničena je samo na nazivne struje za koju se mogu upotrijebiti osigurači, te samo do napona 35 kV, jer se za više napone ne proizvode osigurači.

Za veće struje i više napone dolaze u obzir samo sklopke.

4.4. MJERNI TRANSFORMATORI

A. Općenito

Uređaji za mjerenje i zaštitu u visokonaponskim postrojenjima ne priključuju se neposredno na vodove visokog napona, jer bi takav priključak — kad bi i bio izveden — tražio izgradnju vrlo skupih mjernih instrumenata i releja radi visokih napona (izolacija, dimenzije instrumenata i releja) i velikih struja (presjeci vodiča, sile među vodičima). Da se to izbjegne, upotrebljavaju se mjerni transformatori kojima je zadatak da pogonske struje i pogonske napone transformiraju na veličine koje omogućuju upotrebu instrumenata i releja izgrađenih za nazivne struje od 5 A odnosno 1 A, i za nazivne napone od 100 V (u starijim rasklopnim postrojenjima može se naći naponske mjerne transformatore za nazivni napon 110 V).

Razlikujemo strujne i naponske transformatore. Prvi služi za transformaciju struje od veličine koja protječe kroz vod, generator ili transformator, na veličinu koja se može pustiti kroz instrument ili relej. Druga vrsta mjernih transformatora — naponski — transformiraju visoki napon na onaj, koji mogu izdržati uređaji za mjerenje i zaštitu.

B. Strujni mjerni transformatori

a) Djelovanje

Strujni mjerni transformatori principijelno su izvedeni kao svaki transformator sa željezom, a sastoje se od primarnog i sekundarnog namota, te od željezne jezgre od limova (sl. 4.124a). Primarni namot priključen je u seriju s potrošačima, odnosno s generatorima, pa struja kroz taj namot praktički ne ovisi o prilikama na sekundarnoj strani. Na sl. 4.124b prikazana je ekvivalentna shema strujnog transformatora, dok je na sl. 4.124c prikazana ekvivalentna shema za prijenosni omjer 1 : 1.

Promotrimo prilike u strujnom mjernom transformatoru s prijenosnim omjerom 1 : 1. Na sekundarne stezaljke priključen je mjerni instrument ili relej impedancije $\mathbf{Z}$, a kroz primarni namot teče struja $\mathbf{I}_1$. Dio struje $\mathbf{I}_1$ potreban je za održavanje magnetskog toka, pa mora biti

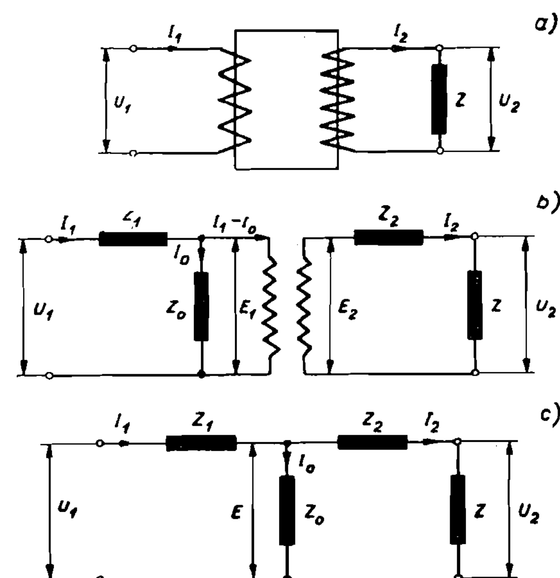
$$\mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_2 \qquad \dots (4.194)$$

gdje su $\mathbf{I}_0$ struja magnetiziranja, a $\mathbf{I}_2$ struja u sekundarnom namotu. Relacija (4.194) vrijedi za prijenosni omjer 1 : 1, dok za prijenosni omjer $n_1 : n_2$ vrijedi

$$\mathbf{I}_1 n_1 - \mathbf{I}_0 n_1 = \mathbf{I}_2 n_2 \qquad \dots (4.195)$$

Da bi kroz impedanciju $\mathbf{Z}$, priključenu na sekundarne stezaljke, protekla struja $\mathbf{I}_2$, potrebno je da na stezaljkama vlada napon $\mathbf{U}_2$, koji je jednak $\mathbf{I}_2\mathbf{Z}$. Elektromotorna sila $\mathbf{E}_2$ veća je za pad napona u reaktanciji $\mathbf{Z}_2$ od napona $\mathbf{U}_2$. O potrebnoj veličini elektromotorne sile ovisi indukcija u željezu, prema relaciji, koja vrijedi za sinusni napon,

$$B = \frac{E_2}{4{,}44\, n_2 f q} \ \mathrm{Vs/m^2}\ (\mathrm{T}) \qquad \dots (4.196)$$

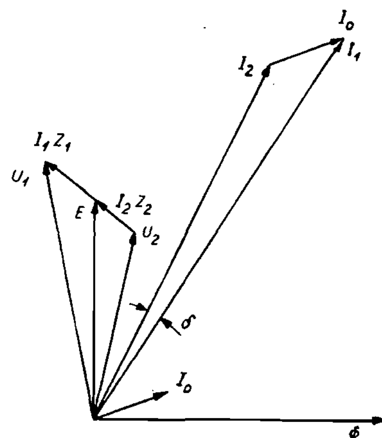


Slika 4.124. Shema spoja (a), ekvivalentna shema spoja (b) i ekvivalentna shema spoja (c) uz prijenosni omjer 1:1 strujnog transformatora

gdje su f frekvencija (s^{-1}), a q (m^2) presjek željeza u jezgri za koju je — prema krivulji magnetiziranja za upotrebljenu vrstu željeznih limova — potrebna određena struja magnetiziranja $\mathbf{I}_0$. Struja magnetiziranja za promatrani strujni transformator i za konstantnu primarnu struju ovisi, dakle, samo o impedanciji $\mathbf{Z}$, odnosno pri istim prilikama o naponu $\mathbf{U}_2$, pa prema tome i elektromotorna sila $\mathbf{E}_2$ i napon $\mathbf{U}_1$, ovise također samo o impedanciji $\mathbf{Z}$. Uspoređujući strujni transformator s transformatorom snage možemo konstatirati razliku, koja je posljedica načina priključka. Transformator snage priključen je paralelno potrošačima, odnosno generatorima, pa promjene na sekundarnoj strani praktički ne utječu na visinu napona na primarnim stezaljkama. Prema tome je struja magnetiziranja praktički neovisna o prilikama na sekundarnoj strani transformatora. S druge pak strane, napon na sekundarnoj strani transformatora snage — ako zanemarimo pad napona u transformatoru — ovisi samo o narinutom naponu na primarnoj strani, dok u strujnom mjernom transformatoru — ako analogno zanemarimo struju magnetiziranja — struja u sekundarnom namotu ovisi samo o struji u primarnom namotu (koju bi po analogiji mogli nazvati narinutom strujom).

Iz tih razlika slijedi i različito vladanje tih dviju vrsta transformatora u praznom hodu i kratkom spoju. U praznom hodu kroz primarni namot transformatora snage teče struja magnetiziranja, koja ovisi o naponu na koji je priključen primarni namot. Pri praznom hodu strujnog transformatora — otvoren sekundarni namot — kroz primarni namot teče struja

$\mathbf{I}_1$ koju trebaju potrošači, odnosno koju proizvode generatori. U sekundarnom namotu nema struje, pa nema ni protjecanja koje bi se suprotstavilo protjecanju primarne struje. Radi toga ukupna primarna struja služi za magnetiziranje jezgre, što uz $\mathbf{I}_2 = 0$ izlazi i iz relacije (4.194), odnosno (4.195), jer je sada $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_0$. Tolika struja magnetiziranja — kad primarna struja ostane u granicama nazivne struje strujnog transformatora — dovest će do znatnog povećanja indukcije u željeznoj jezgri, što će s jedne strane uzrokovati povećanje gubitaka u željezu, a s druge povišenje napona na stezaljkama strujnog transformatora.



Slika 4.125. Vektorski dijagram struja i napona u strujnom transformatoru

Povećanje gubitaka dovodi do ugrijavanja jezgre. Strujni transformator s više amperzavoja može se toliko ugrijati da izgori izolacija i da željezni limovi izmijene magnetska svojstva, čime on, s obzirom na tačnost mjerenja, postaje neupotrebljiv dok se ne promijeni željezna jezgra. Ugrijavanje željezne jezgre možemo približno odrediti iz relacije (Lit. 48)

$$\frac{\Delta \vartheta}{\Delta t} = 2{,}2\, V_{\check{z}}\ 10^{-3}\ {}^0\mathrm{C/s} \qquad \ldots (4.197)$$

gdje su $V_{\check{z}}$ gubici u željezu (W/kg) pri indukciji u praznom hodu. Izraz (4.197) vrijedi uz pretpostavku da nema odvođenja topline u okolinu, pa prema tome daje nepovoljniju sliku od one koju treba očekivati u stvarnosti.

Napon na stezaljkama transformatora zna porasti toliko da može ugroziti izolaciju strujnog transformatora, i dovesti u opasnost poslužno osoblje. Elektromotorna sila, a prema tome i napon na sekundarnim stezaljkama jer se radi o praznom hodu, određeni su relacijom

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \qquad \ldots (4.198)$$

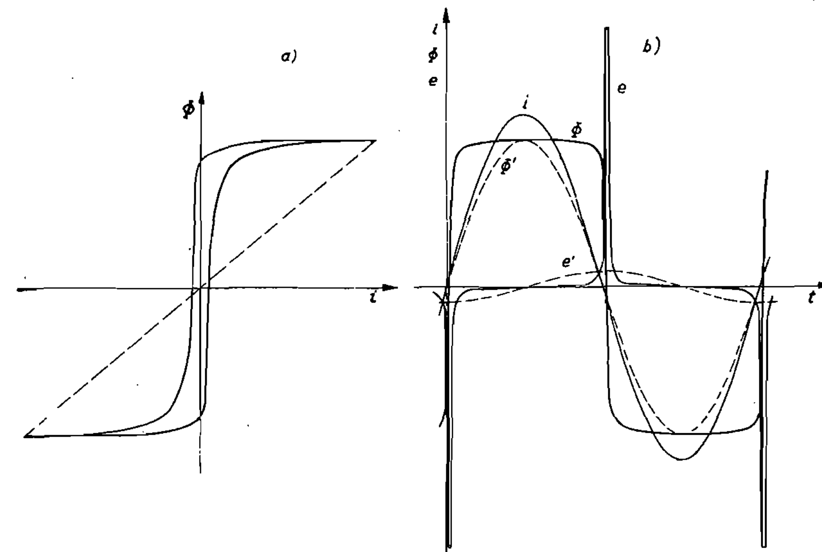
Da bismo kvalitativno prikazali promjenu napona, podimo od petlje histereze (sl. 4.126a). I sada imamo situaciju koja se razlikuje od one u učinskim transformatorima, gdje su tok i elektromotorna sila sinusni, dok struja magnetiziranja sadrži, osim osnovnog vala, i valove trostruke i viših frekvencija. Nasuprot tome, u strujnom je transformatoru struja I_1, pa je prema izloženom i struja magnetiziranja I_0 u praznom hodu sinusna. Zato tok i elektromotorna sila ne mogu biti sinusni radi oblika krivulje magnetiziranja, odnosno petlje histereze. Radi nagle promjene toka u području u kojem je tok blizu vrijednosti nula, dolazi do znatnih napona, kako je pokazano na sl. 4.126. Napon na sekundarnim stezaljkama bit će to veći, što je veći broj amperzavoja primarne strane, što je veći presjek željezne jezgre (za istu indukciju veći tok!) i što je manja sekundarna nazivna struja (više zavoja sekundarnog namota!).

Jedino efikasno sredstvo sprečavanja takvih povišenja napona jest: ne ostavljati otvoren sekundarni namot strujnog transformatora.

Nasuprot tome nema nikakve opasnosti za strujni transformator ako su sekundarne stezaljke kratko spojene. Tada je elektromotorna sila u transformatoru vrlo malena, jer ona treba da iznosi upravo koliki je pad napona u sekundarnom namotu. Radi toga je i struja magnetiziranja malena. Sekundarnu struju možemo prema (4.195) prikazati relacijom

$$\mathbf{I}_2 = \frac{n_1}{n_2}\,(\mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_0) \qquad \ldots (4.199)$$

pa kad je $I_0 \cong 0$, što nastaje kad su sekundarne stezaljke kratko spojene, sekundarna struja u promatranom strujnom transformatoru ovisi samo



Slika 4.126 Primarna struja (i), tok (Φ) i elektromotorna sila (e) sekundarno otvorenog strujnog transformatora, te tok (Φ') i elektromotorna sila (e') sekundarno kratkospojenog transformatora

o primarnoj struji. To vrijedi tim tačnije što je veća nazivna snaga strujnog transformatora. Ona, dakle, u normalnom pogonu — i pored kratkospojenih sekundarnih stezaljki — neće postati bitno veća od struje koja će teći kroz sekundarni namot, kad je na njegove stezaljke priključena reaktancija Z_2 konačne veličine. Strujni transformator može, dakle, trajno ostati u pogonu s kratkospojenim sekundarnim stezaljkama.

To, međutim, nije slučaj s učinskim transformatorom, jer će kroz njegov sekundarni namot tada protjecati znatno veća struja nego u normalnom pogonu (i do 20 puta veća, što ovisi o reaktanciji transformatora), a to bi sigurno dovelo do nedopuštenog ugrijavanja.

b) Tačnost strujnih transformatora

Razlikujemo *strujnu* i *kutnu* pogrešku strujnih transformatora.

Strujna pogreška u postocima određena je relacijom

$$\Delta i = \frac{K I_2 - I_1}{I_1} 100\% \qquad \dots (4.200)$$

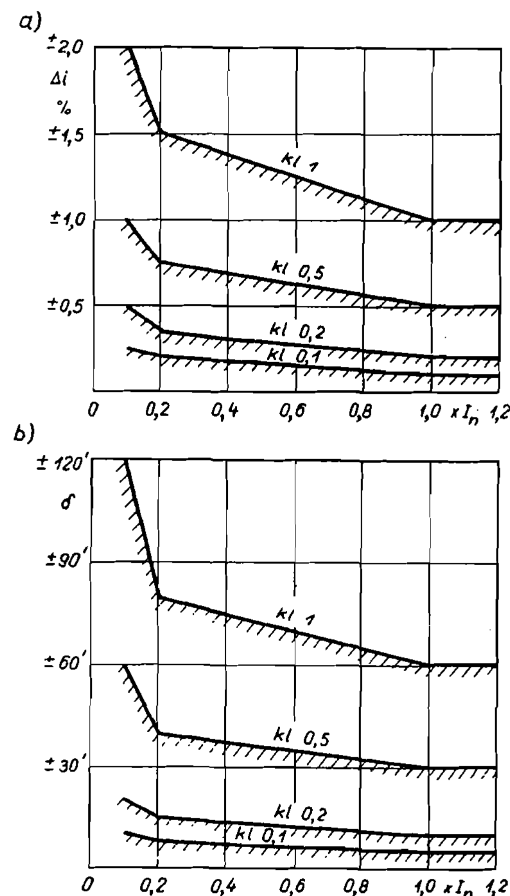
gdje je K prijenosni omjer (omjer primarne i sekundarne nazivne struje), dok su I_1 i I_2 apsolutne vrijednosti primarne i sekundarne struje. Kutna pogreška (δ) definirana je kutom između primarne i sekundarne struje (sl. 4.125). Strujna pogreška je pozitivna ako je Δi (4.200) pozitivno, dok je kutna pogreška pozitivna ako sekundarna prethodi primarnoj struji.

Klasa tačnosti strujnog transformatora jednaka je dopuštenoj apsolutnoj strujnoj pogrešci u postocima pri nazivnoj snazi i 120% nazivne primarne struje. Treba naglasiti da je dopuštena strujna pogreška jednaka i za nazivnu struju i za 120% od nazivne struje. Tako npr. strujni transformator klase tačnosti 1 ima dopuštenu strujnu pogrešku od ± 1% za 120% nazivne struje. Prema preporukama IEC (iz 1966. godine) razlikujemo slijedeće klase tačnosti strujnih transformatora: 0,1; 0,2; 0,5; 1, 3 i 5. Za pojedine klase tačnosti propisane su dopuštene pogreške u *ovisnosti o struji opterećenja*. **Dopuštene** *strujne* **pogreške prikazane su na sl. 4.127a, a dopuštene kutne pogreške na sl. 4.127b. Za klase 3 i 5 greška ne smije biti veća od 3,0% odnosno 5,0% za područje od 0,5 I_n do 1,2 I_n, dok za područje ispod 0,5 I_n preporuke ne određuju dopuštenu strujnu pogrešku. Za klase 3 i 5 granice kutnih pogrešaka preporukama nisu ograničene.**

Pogreške strujnih transformatora ne ovise samo o struji nego i o veličini impedancije priključene na sekundarne stezaljke, te o faktoru snage te impedancije. Preporuke IEC preciziraju da propisane granice pogreške vrijede ako se priključena impedancija kreće između 1/4 do 4/4 nazivne impedancije (nazivnog tereta) strujnog transformatora, te ako je faktor snage priključene impedancije $\cos\varphi = 0{,}8$. Za strujne transformatore klase 3 i 5 granica se kreće između 2/4 i 4/4 nazivne impedancije.

Jedna od karakteristika strujnog transformatora jest prijenosni omjer koji je definiran omjerom nazivne primarne i nazivne sekundarne struje. Imamo npr. strujni transformator prijenosnog omjera 500/5 A. To međutim ne znači da je omjer broja zavoja u istom omjeru, tj. 1 : 100, već da je uz grešku koja je definirana klasom tačnosti — sekundarna struja 100 puta manja od primarne. Da bi se, naime, što više eliminirao utjecaj struje

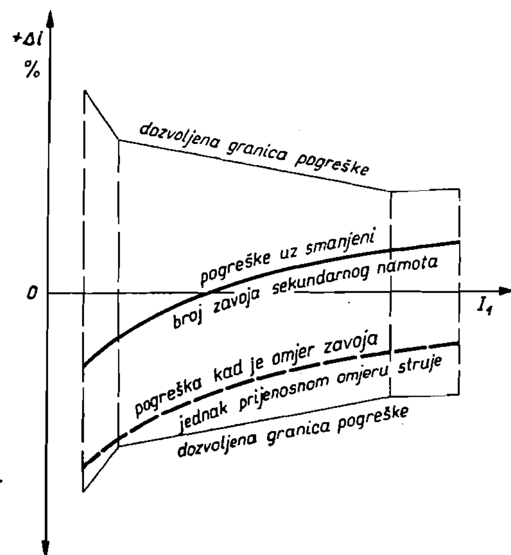
magnetiziranja, omjer broja zavoja izvodi se nešto manji od omjera nazivnih struja. Ako je npr. za navedeni prijenosni omjer struja strujni transformator izveden s omjerom broja zavoja 1 : 99, sekundarna struja će biti za oko 1% veća nego u slučaju kad bi omjer zavoja bio 1 : 100.



Slika 4.127. Dozvoljene strujne i kutne pogreške strujnih transformatora prema njemačkim propisima

Kad bi strujni transformator bio izveden s omjerom zavoja koji je jednak prijenosnom omjeru struja, strujna pogreška bi uvijek bila negativna (crtkana krivulja na sl. 4.128). Smanjenjem broja zavoja sekundarnog namota, krivulja koja prikazuje ovisnost pogreške o opterećenju pomiče se prema području pozitivne pogreške (puno izvučena krivulja na sl. 4.128).

Da ukažemo na ovisnost pogreške strujnog transformatora o faktoru snage priključene impedancije, poslužimo se sl. 4.129, koja se osniva na vektorskom dijagramu struja (sl. 4.125). Ako zamislimo da je na stezaljke sekundarnog namota priključena impedancija konstantnog iznosa, ali promjenljivog faktora snage $\cos\varphi$, elektromotorna sila **E** uz konstantnu primarnu struju ostat će nepromijenjena, pa se ni struja magnetiziranja $\mathbf{I}_0$ neće mijenjati. Fazni pomak ψ između **E** i $\mathbf{I}_0$ ostat će također nepromijenjen. Vrh vektora struje $\mathbf{I}_1$, koja ostaje po iznosu konstantna, opisivat će krug sa središtem u ishodištu 0, pa će se na tom krugu nalaziti i vrh vek-



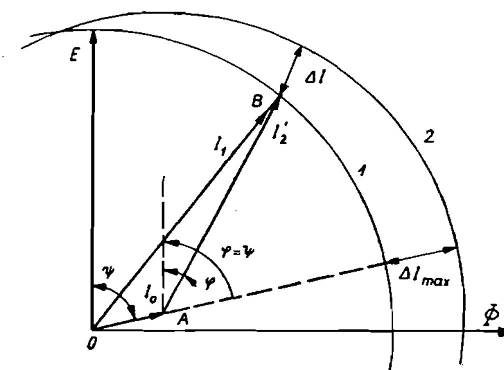
Slika 4.128. Utjecaj smanjenja broja zavoja sekundarnog namota

tora $\mathbf{I}_2'$, koji je jednak razlici između $\mathbf{I}_1$ i $\mathbf{I}_0$. Ako se promijeni kut φ, struja $\mathbf{I}_2'$ zatvarat će nov kut φ sa smjerom elektromotorne sile, a to će određivati i novu tačku na krugu 1. Ako sada nacrtamo krug 2 sa središtem u A (vrh vektora struje magnetiziranja), ali sa istim polumjerom kao i krug 1 (veličina struje $\mathbf{I}_1$), razmak između krugova u smjeru struje $\mathbf{I}_2'$ predstavljat će veličinu strujne pogreške, jer kad ne bi postojala pogreška, bilo bi $\mathbf{I}_2' = \mathbf{I}_1$. Najveća strujna pogreška pojavit će se kad bude $\varphi = \psi$, dakle pri izrazito induktivnom opterećenju strujnog transformatora.

c) Snaga strujnog transformatora

Prema (4.196) elektromotorna sila u sekundarnom namotu jest

$$E_2 = 4{,}44\ n_2 f q B \ \text{V} \qquad \dots (4.201)$$



Slika 4.129. Ovisnost strujne pogreške o faktoru snage impedancije sekundarne strane strujenog transformatora

pa uz struju I_2, snaga koja se prenosi na sekundarnu stranu iznosi

$$P_2 = E_2 I_2 = 4{,}44\, n_2 f q B I_2 \ \text{VA} \qquad \dots (4.202)$$

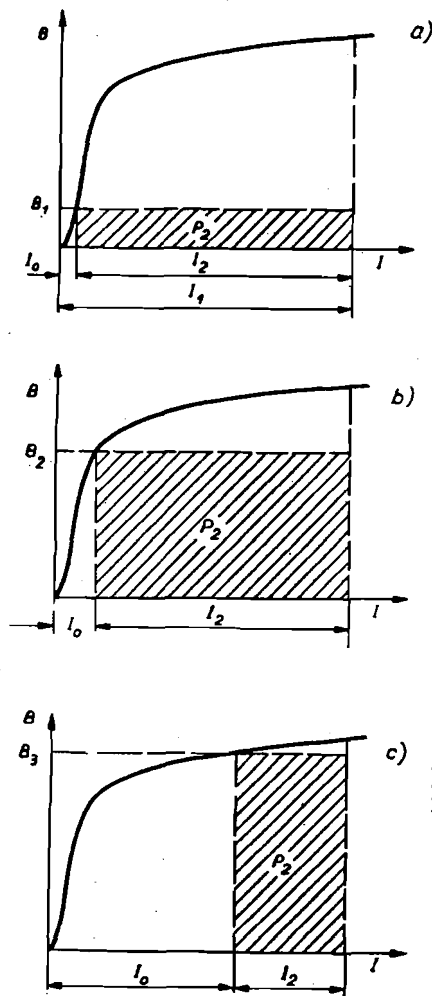
Potrebna snaga na sekundarnoj strani strujnog transformatora može se prikazati relacijom

$$P_2 = I_2^2 (Z_2 + Z) \qquad \dots (4.203)$$

gdje su Z_2 i Z impedancije definirane na sl. 4.124. Povećanjem, dakle, impedancije priključene na sekundarne stezaljke povećava se i potrebna snaga koju transformator mora da prenese na sekundarnu stranu. To praktički znači da je za veći broj mjernih instrumenata i releja priključenih na sekundarnoj strani strujnog transformatora potrebna i veća snaga (oni se uvijek spajaju u seriju, jer se tako osigurava protjecanje iste struje kroz sve priključene instrumente i releje). Da bi se tada održala pogreška unutar dopuštenih granica, mora struja magnetiziranja ostati malena, što se postiže malom indukcijom B, pa je potrebno radi veće snage strujnog transformatora povećati presjek q željezne jezgre. Prema tome konstrukcija strujnog transformatora ovisi o potrebnoj snazi na sekundarnoj strani.

Mogućnost prijenosa snage na sekundarnu stranu već izvedenog strujnog transformatora ovisi o produktu indukcije B i struje I_2, jer su sve ostale veličine u (4.202) za izvedeni transformator konstante. Ovisnost snage strujnog transformatora o indukciji B, odnosno o elektromotornoj sili E_2 (ona je proporcionalna s indukcijom), može se uočiti pomoću krivulje magnetiziranja (sl. 4.130). Razmatranje tačno vrijedi uz pretpostavku da je struja magnetiziranja I_0 u fazi sa strujom I_2. Promatrajmo, dakle, strujni transformator kroz čiji primarni namot protječe struja I_1, te povećavajmo postepeno impedanciju Z. Za malu impedanciju bit će potrebna i mala elektromotorna sila, prema tome i mala indukcija B_1, te mala struja magnetiziranja I_0 (sl. 4.130a). Snaga P_2 (4.202) proporcionalna je površini pravokutnika osnovice I_2 i visine B_1. Povećanjem impedancije Z (sl.

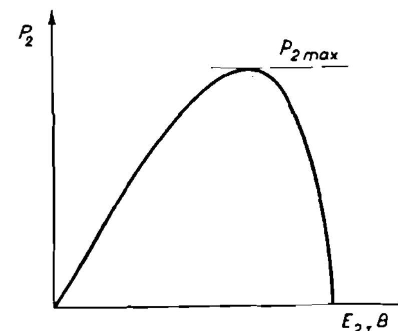
4.130b) raste indukcija, ali i pored smanjenja struje I_2 raste snaga koja se prenosi na sekundarni namot. Taj porast snage P_2 postizat će se sve dok porast indukcije ne bude kompenziran porastom struje magnetiziranja. Daljnjim porastom impedancije Z (sl. 4.130c), a radi zasićenja željezne jezgre, naglo će rasti struja magnetiziranja, pa će sekundarna snaga po-



Slika 4.130. Prikaz sekundarne snage strujnog transformatora u ovisnosti o priključenoj impedanciji na sekundarnim stezaljkama uz pretpostavku da je I_2 u fazi s I_0

stajati sve manja, dok za $Z = \infty$ ne postane jednaka nuli. Na sl. 4.131. prikazan je primjer ovisnosti sekundarne snage o elektromotornoj sili. Treba napomenuti da dijagrami na sl. 4.130. s obzirom na struje prikazuju odnose za prijenosni omjer 1 : 1. Za drugi prijenosni odnos trebalo bi umjesto sa strujama, računati s amperzavojima.

Kao što se vidi, o sekundarno priključenoj impedanciji ovisi struja magnetiziranja, pa prema tome i pogreška strujnog transformatora. Radi toga je prilikom određivanja karakteristika strujnog transformatora potrebno znati kakvi će instrumenti ili releji i koliko će ih biti priključeno na sekundarnu stranu strujnog transformatora, jer o tomu ovisi njegova konstrukcija. Nazivnu sekundarnu snagu strujnog transformatora, što je



Slika 4.131. Primjer ovisnosti sekundarne snage (P_2) strujnog transformatora o elektromotornoj slici (E_2) odnosno o indukciji (B)

maksimalna snaga do koje se može opteretiti strujni transformator ako se želi ostati u granicama pogreške, može se definirati na dva načina: stariji je pomoću nazivne impedancije Z_n koja se maksimalno smije priključiti na sekundarne stezaljke (nazivnu impedanciju nazivamo i nazivnim bremenom) i noviji, pomoću nazivne snage. Nazivna snaga definirana je relacijom

$$P_{n2} = I^2_{n2} Z_n \text{ VA} \qquad \ldots (4.204)$$

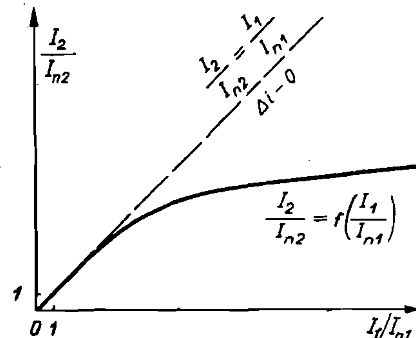
gdje je I_{n2} nazivna sekundarna struja.

d) Vladanje strujnog transformatora pri povećanoj primarnoj struji

Za vladanje strujnog transformatora u pogonu nisu važne samo njegove karakteristike opterećenja do nazivne struje, već i karakteristike strujnog transformatora kad kroz primarni namot protječu struje znatno veće od nazivnih.

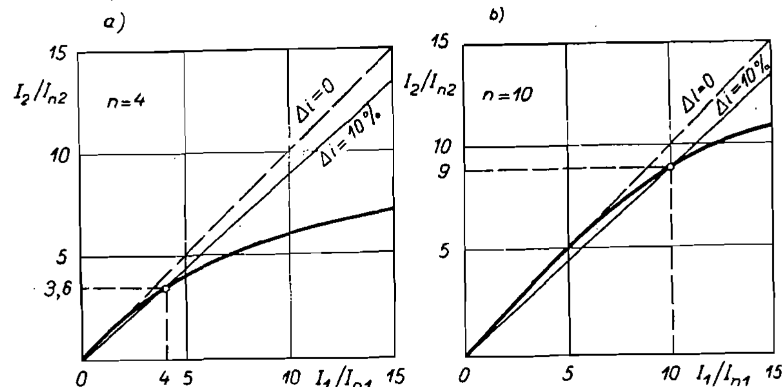
Povećanjem primarne struje, uz konstantnu impedanciju na sekundarnoj strani, raste pogreška strujnog transformatora. Ako primarna struja toliko naraste da indukcija znatno prijeđe koljeno na krivulji magnetiziranja, porast sekundarne struje bit će proporcionalan s porastom primarne struje, jer će se tada strujni transformator vladati kao transformator bez željeza. Sekundarna struja ne teži, dakle, k nekoj graničnoj vrijednosti. Ovisnost sekundarne struje o primarnoj prikazana je na sl. 4.132. Na ordinati je relativna sekundarna struja (omjer između stvarne, I_2, i nazivne sekundarne struje I_{2n}), a na apscisi relativna primarna struja (omjer između stvarne, I_1, i nazivne primarne struje I_{1n}), da bi se eliminirao utjecaj prijenosnog omjera. Na sl. 4.132. označeno je područje nazivnih struja ($I_1/I_{n1} = 1$ i $I_2/I_{n2} = 1$). Crtkani pravac predstavljao bi ovisnost relativnih struja, kad bi strujna pogreška bila jednaka nuli ($\Delta i = 0$), odnosno kad bi relativne struje bile jednake. Ovisnost prikazanu na sl. 4.132. nazivamo i nadstrujnom karakteristikom strujnog transformatora.

Vladanje strujnog transformatora u području struja iznad nazivne karakterizirano je strujnim višekratnikom (n). To je višekratnik primarne nazivne struje (odnosno relativna primarna struja I_1/I_{n1}), pri kojemu strujna pogreška, uz sekundarno priključenu nazivnu impedanciju, iznosi 10%.



Slika 4.132. Ovisnost relativne sekundarne struje (I_2/I_{n2}) o relativnoj primarnoj struji (I_1/I_{n1}). Crtkani pravac vrijedi za strujni transformator bez strujne pogreške

Pri određivanju strujnog višekratnika možemo upotrijebiti nadstrujnu karakteristiku strujnog transformatora. Na sl. 4.133, osim pravca $\Delta i = 0$ koji prikazuje ovisnost relativnih struja transformatora bez strujne pogreške, ucrtan je i pravac za negativnu strujnu pogrešku od 10% ($\Delta i = 10\%$), koji je dobiven smanjenjem ordinata pravca $\Delta i = 0$ za 10%. Apscisom tačke u kojoj se siječe nadstrujna karakteristika s pravcem $\Delta i = 10\%$ određen je strujni višekratnik. Za strujne transformatore, kojih su nadstrujne karakteristike prikazane na sl. 4.133a i 4.133b, iznosi $n = 4$ odnosno $n = 10$.

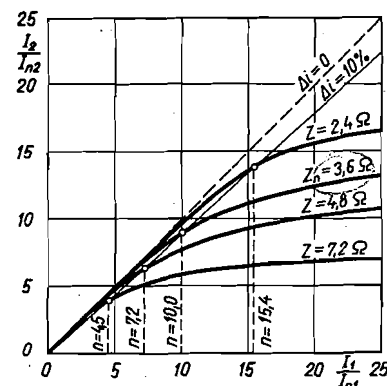


Slika 4.133. Nadstrujne karakteristike strujnih transformatora: a) $n = 4$, b) $n = 10$

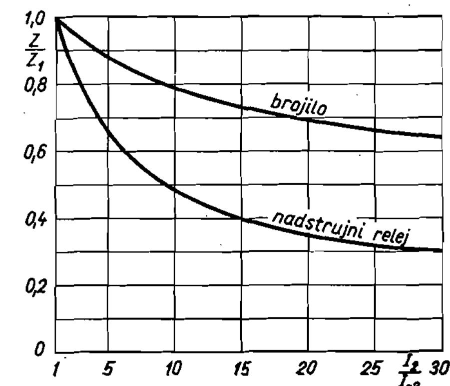
Posebno treba naglasiti — iako je to već spomenuto — da je strujni višekratnik ovisan o priključenoj impedanciji, pa ako nije posebno napomenuto, strujni višekratnik se odnosi na nazivnu impedanciju Z_n. Ukoliko na sekundarnu stranu nije priključena nazivna impedancija, novi strujni višekratnik može se približno odrediti iz relacije

$$n_1 \cong \frac{n\, Z_n}{Z_1} \qquad \dots (4.205)$$

gdje je Z_1 stvarno priključena impedancija. Približno relacija vrijedi, jer s priključkom manje impedancije postaje i potrebna elektromotorna sila manja, a time i struja magnetiziranja, što izaziva i manju pogrešku. U stvarnosti dolazi do nešto većeg strujnog višekratnika (10 do 20%) nego što se dobiva prema (4.205) radi toga, jer struja magnetiziranja nije proporcionalna s elektromotornom silom. Na sl. 4.134. prikazane su nadstrujne karakteristike strujnog transformatora za nazivno breme $Z_n = 3{,}6\ \Omega$, iz kojih je vidljiv utjecaj bremena na strujni višekratnik.



Slika 4.134. Ovisnost strujnog višekratnika o bremenu na sekundarnoj strani strujnog transformatora



Slika 4.135. Primjer promjene impedancija brojila i nadstrujnog releja u slučaju povećanja sekundarne struje (Lit. 48)

Prema preporukama IEC (iz 1966. godine) razlikujemo strujne transformatore za mjerenje i strujne transformatore za zaštitu, pa su i posebno definirane karakteristike transformatora u području iznad nazivne struje.

U tom području vladanje strujnog transformatora za mjerenje karakterizirano je nazivnom sigurnosnom strujom (I_{1s}), koja je definirana kao primarna struja kod koje produkt sekundarne struje I_{2s} i nazivnog prijenosnog omjera K_n nije veći od 0,9 I_{1s}. Ako prijenosni omjer napišemo pomoću nazivnih struja dolazimo do relacije

$$\frac{I_{2s}}{I_{2n}} \leqq 0{,}9\, \frac{I_{1s}}{I_{2n}} = 0{,}9\, F_s \qquad \dots (4{,}205a)$$

gdje je F_s faktor sigurnosti definiran omjerom nazivne sigurnosne struje i nazivne primarne struje strujnog transformatora, što nije ništa drugo nego već definirani strujni višekratnik. Standardne vrijednosti faktora sigurnosti su $F_s = 5$ i $F_s = 10$.

Da bi se uzeo u obzir utjecaj viših harmoničnih članova sekundarne struje, koji se pojavljuju zbog zasićenja željeza pri velikim strujama, navodi se — prema preporukama IEC za strujne transformatore za zaštitu — složena pogreška definirana izrazom

$$p_{is} = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n\, i_2 - i_1)^2\, dt} \qquad \dots (4.205b)$$

koja je određena kao omjer efektivne vrijednosti razlike između trenutnih vrijednosti sekundarne struje pomnožene nazivnim prijenosnim omjerom i trenutnih vrijednosti primarne struje (vrijednost korijena u relaciji za p_{it}) i efektivne vrijednosti primarne struje (I_1). S obzirom na složenu pogrešku preporuke razlikuju dvije klase tačnosti (5*P* i 10*P*), koje su definirane dopuštenom složenom pogreškom od 5% i 10%. Najveća primarna struja, uz koju strujni transformator ima dopuštenu složenu pogrešku, nazvana je nazivna primarna granična struja tačnosti. Omjer između nazivne primarne granice struje tačnosti i nazivne primarne struje strujnog transformatora nazvan je graničnim faktorom tačnosti. Standardne su vrijednosti toga faktora: 5, 10, 15, 20 i 30. Granični faktor tačnosti analogan je, dakle, strujnom višekratniku s razlikom da je definiran složenom, a ne strujnom pogreškom, te da se uvodi — pored klase tačnosti 10*P* — još i klasa 5*P*. Preporukama je takođe određena klasa tačnosti pri nazivnoj struji, pa klasa 5*P* ima dopuštenu strujnu pogrešku pri nazivnoj struji od ± 1% (klasa 1), a klasa 10*P* strujnu pogrešku od ± 3% (klasa 3).

Izborom strujnih transformatora s malim strujnim višekratnikom štite se priključeni instrumenti od prevelikih struja. Ta zaštita samo je prividna, ako se na sekundarne stezaljke priključi manja impedancija od nazivne. Radi toga je potrebno — ako priključeni instrumenti nemaju dovoljnu impedanciju — priključiti u seriju dodatnu impedanciju. Pri razmatranju ispunjenja zahtjeva za ispravno opterećenje strujnog transformatora, treba u nekim slučajevima uzeti u obzir da se prilike u instrumentima i relejima sa željezom mijenjaju s porastom struje. Induktivni pad napona ne raste proporcionalno sa strujom radi zasićenja željeza, što je ekvivalentno smanjenju impedancije s porastom struje. Na sl. 4.135. prikazana je promjena impedancije jednog brojila i jednog nadstrujnog releja.

Povećanjem sekundarne struje raste i elektromotorna sila. Ona je proporcionalna struji, ako je sekundarna impedancija konstantna. To dovodi do znatnog povećanja sekundarnog napona, pogotovo kad se radi o većim snagama strujnog transformatora. Veća snaga, naime, znači i veće nazivno breme, koje uz istu sekundarnu struju traži veći sekundarni napon.

e) Karakteristike strujnog transformatora

S obzirom na aparate koji će biti priključeni na sekundarnu stranu strujnih transformatora, te s obzirom na prilike u strujnom krugu u koji će biti uključen primarni namot strujnog transformatora, treba odabrati takve karakteristike strujnog transformatora koje će osigurati potreban stupanj tačnosti i potrebnu sigurnost u pogonu.

Da se strujni transformator potpuno definira potrebno je — osim nazivnog napona i frekvencije mreže — poznavati slijedeće karakteristike: prijenosni omjer, klasu tačnosti, nazivnu snagu, strujni višekratnik, termičku graničnu struju i dinamičku graničnu struju.

Primarna nazivna struja odabire se prema maksimalnoj struji koja teče kroz primarni namot u normalnom pogonu. Važno je primarnu nazivnu struju odabrati tako da se maksimalna struja u normalnom pogonu znatno ne razlikuje od nje. Osobito treba izbjegavati izbor strujnih transformatora znatno veće nazivne struje, radi eventualnog kasnijeg proširenja, jer će to nepotrebno dovoditi do znatnijih grešaka mjerenja, pogotovo pri malim opterećenjima. Pri izboru primarne nazivne struje treba imati u vidu i činjenicu da su strujni transformatori građeni tako da mogu trajno izdržati i 20% veću struju od nazivne.

Strujni transformatori se izvode za slijedeće primarne nazivne struje:

10 — 12,5 — **15** — **20** — 25 — **30** — 40 — **50** — 60 — **75** A

te za 10 ili 100 puta veće struje. Deblje otisnute vrijednosti češće se upotrebljavaju. Ima slučajeva kad se upotrebljava transformator primarne nazivne struje i od 5 A, pa i niže, da bi se odijelio visoki napon od mjerenja i zaštite.

Kao sekundarna nazivna struja odabire se normalno 5 A, a u nekim slučajevima i 1 A. Za velike primarne nazivne struje (4000 A i više) odabire se sekundarna nazivna struja i od 10 A.

Strujni transformatori sekundarne nazivne struje 1 A upotrebljavaju se u slučaju većih udaljenosti između strujnih transformatora i na njih priključenih instrumenata i releja, kako bi se uz iste gubitke mogli upotrijebiti spojni vodovi manjeg presjeka.

Upotrebom strujnih transformatora s nazivnom sekundarnom strujom od 1 A dolazi se — pri većim snagama strujnih transformatora i većim strujnim višekratnicima — u slučaju kratkog spoja do nedopušteno visokih napona na sekundarnim stezaljkama. Ispitni napon sekundarnog dijela strujnih transformatora i na njih priključenih instrumenata i releja iznosi 2000 V. Ako npr. upotrijebimo strujni transformator snage 240 VA, uz nazivnu sekundarnu struju od 1 A napon na sekundarnoj strani iznosit će 240 V. Pri npr. desetorostrukoj sekundarnoj struji, do koje može lako doći u slučaju kratkog spoja, kad je strujni višekratnik n = 10, napon bi porastao na 2400 V, kad bi napon na sekundarnim stezaljkama bio sinusan. Budući da pri tolikoj struji dolazi do zasićenja jezgre, napon će biti još veći od 2400 V, što će lako dovesti do proboja izolacije. Da se postigne sigurnost, mora biti ispunjena nejednažba.

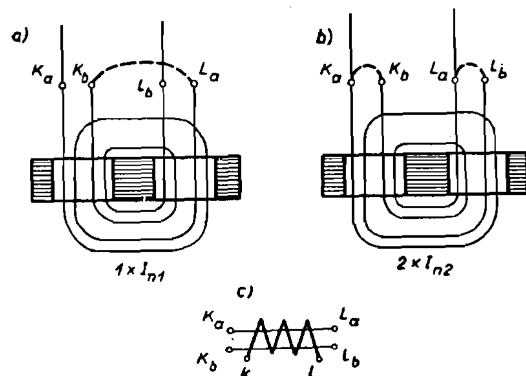
$$I_k \frac{I_{n2}}{I_{n1}} Z_n < 2000 \text{ V} \qquad \dots (4.206)$$

gdje je I_k **efektivna** vrijednost **izmjenične komponente struje kratkog spoja**. Produkt I_k i omjera I_{n2}/I_{n1} predstavlja struju u slučaju kratkog spoja, koja bi tekla u sekundarnom namotu kad bi pogreška bila jednaka nuli. Na taj način računamo s većom strujom u sekundarnom namotu od one koja će stvarno kroz njega protjecati, pa to unosi u račun izvjesnu sigurnost.

Strujne transformatore sa sekundarnom nazivnom strujom 1 A treba, dakle, samo tamo upotrebljavati gdje se ne pojavljuju vrlo visoke struje kratkog spoja i gdje se može izići s manjim nazivnim snagama strujnog transformatora. Spomenuti uvjeti gotovo su uvijek ispunjeni u rasklopnim postrojenjima iznad 60 kV

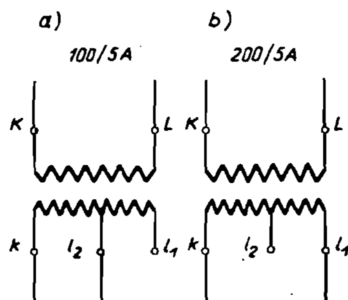
Radi sniženja sekundarnog napona može se u slučaju vrlo visokih primarnih nazivnih struja (4000 A i više) odabrati također sekundarna nazivna struja od 10 A, jer tada uz isti broj zavoja primarnog namota napon E_2 (4.201) postaje za 50% manji.

Često se zbog budućeg proširenja mreže želi imati prespojiv strujni transformator. Takav će transformator neposredno nakon postavljanja raditi s manjom primarnom nazivnom strujom, dok će kasnije, kad opterećenje poraste, nakon prespajanja moći biti upotrebljen za veću primarnu nazivnu struju. Pri tome ne treba zaboraviti da u svakom slučaju sekundarna nazivna struja mora ostati nepromijenjena, jer i nakon prespajanja ostaju isti instrumenti i releji. Prespajanje se normalno vrši na primarnoj strani.



Slika 4.136. Strujni transformator prespojiv u omjeru 1:2 na strani primarnog namota

Primjer prespajanja na primarnoj strani pokazan je na sl. 4.136. Prikazani strujni transformator može se prespojiti u omjeru 1 : 2. Tako npr. prijenosni omjer može biti 100/5 A i 200/5 A. Za manju primarnu struju oba dijela primarnog namota spojena su u seriju (sl. 4.136a), dok su za veću dijelovi primarnog namota paralelno spojeni (sl. 4.136b). Na analogan način može se ostvariti prespajanje primarnog napona u omjeru 1 : 2 : 4. Prespajanjem na primarnoj strani ne mijenja se broj amperzavoja, pa radi toga ne dolazi ni do promjene snage ni do promjene pogreške.



Slika 4.137. Primjer strujnog transformatora s otcjepima na sekundarnoj strani: (a) spoj za prijenosni omjer 100/5 A, (b) spoj za prijenosni omjer 200/5 A

Prelazom na manji prijenosni omjer pomoću otcjepa na sekundarnom namotu (sl. 4.137) smanjuje se nazivna snaga strujnog transformatora, naravno uz održanje iste pogreške. Ako je npr. transformator prespojiv u omjeru 1 : 2, sa smanjenjem primarne nazivne struje na polovinu smanjuje se i nazivni broj amperzavoja. Radi toga dolazi do smanjenja nazivne snage strujnog transformatora na četvrtinu. Do smanjenja snage dolazi zbog smanjenja broja zavoja na polovinu (4.202) i radi isto tolikog smanjenja indukcije, što je nužno da se postigne potrebno smanjenje struje magnetiziranja (4.195), kako bi se održala klasa tačnosti. S druge pak strane, ako strujni transformator, prespojen na manji prijenosni omjer, ima npr. strujni višekratnik n = 10, taj isti transformator kad bude radio s dvostrukim prijenosnim omjerom, uz iste priključne instrumente ili releje, imat će približno dvostruk strujni višekratnik (n = 20). Tada je naime priključena četiri puta manja impedancija od one koja odgovara nazivnoj snazi, ako je bila postignuta nazivna snaga za manju primarnu nazivnu struju. Radi toga se normalno ne izvode strujni transformatori sa sekundarnim prespajanjem, osim u slučajevima kad ne postoji mogućnost prespajanja na primarnoj strani (štapni strujni transformatori).

U rasklopnim postrojenjima strujni transformatori klase tačnosti 0,5 upotrebljavaju se samo za priključak brojila kad se traži velika tačnost, npr. za obračun potrošnje energije vrlo velikih potrošača. Strujni transformatori klase 1 dolaze u obzir za pogonska mjerenja, pogotovo za mjerne instrumente i releje koji pored strujnog imaju i naponski svitak, pa na tačnost njihova pokazivanja ne utječe samo strujna, već i kutna pogreška. Na strujne transformatore klase 3 priključuju se obično releji koji imaju samo strujni svitak.

Naravno da će se na strujni transformator klase 1 priključiti npr. i ampermetar (ima samo strujni svitak), ako je takav strujni transformator trebalo upotrijebiti radi drugih mjernih instrumenata.

Potrebna nazivna snaga transformatora određuje se prema potrošnji instrumenata i releja, koji će biti priključeni na strujni transformator. Pri tome ne treba zanemariti potrošak u vodovima koji spajaju strujne transformatore s instrumentima i relejima. U tab. 4.17. navedene su gra-

TABLICA 4.17.

Potrošnja instrumenata i releja koji se priključuju na strujni transformator

Mjerni instrument ili relej	Potrošak VA
Pokazni ampermetar	0,7 ... 3
Registracioni ampermetar	3 ... 4
Pokazni vatmetar po fazi	1 ... 3
Registracioni vatmetar po fazi	3
Djelatno i jalovo brojilo po fazi	1
Nadstrujni relej	3
Termički relej	7 ... 10
Diferencijalni relej	1,6
Usmjereni relej	2 ... 10
Distantni relej	6 ... 20

nice potrošnje u VA za pojedine vrste mjernih instrumenata i releja. Tačne podatke treba uzeti iz listâ tvornica.

S obzirom na strujni višekratnik, razlikujemo strujne transformatore za priključak mjernih instrumenata i za priključak releja. Radno područje instrumenata i brojila poklapa se s normalnim područjem rada strujnih transformatora, tj. između 10 i 120% nazivne struje. Znatno veće struje od nazivnih štetne su za mjerne instrumente, jer razvijaju prevelike zakretne momente, pa mogu dovesti do mehaničkog oštećenja instrumenta. U brojilima, osim toga, zbog previsoke magnetske indukcije, može doći još i do oštećenja željeznih jezgri, što dovodi do netačnog rada brojila. Tako oštećeno brojilo može dulje vremena ostati u pogonu a da se nastala pogreška ne opazi. Radi toga se preporučuje, da se upotrebe strujni transformatori sa strujnim višekratnikom manjim od 5 ($n < 5$).

Nasuprot tome, za strujne transformatore na koje će biti priključeni releji, od velike je važnosti što vjernija transformacija u području velikih struja, jer to osigurava ispravan rad releja. Preporučuje se da za nadstrujne nezavisne releje i za termičke releje bude $n > 5$, ali manji od 10, za priključak diferencijalnih i o struji zavisnih releja $n > 10$, dok za priključak distantnih releja još veći.

Termička granična struja (I_{ter}) najveća je efektivna vrijednost primarne struje koju strujni transformator pri kratkospojenom sekundarnom namotu može izdržati 1 sekundu, a da se ne ugrije iznad dopuštene temperature. Termička granična struja kreće se obično između 60 i 120 x I_{n1}, što ovisi o izvedbi. Tačan podatak naveden je u listama tvornica. Ukoliko kratki spoj traje dulje od 1 sekunde, nova termička granica određuje se iz formule

$$I_{ter}' = \frac{I_{ter}}{\sqrt{t}} \qquad \ldots (4.207)$$

gdje je t trajanje kratkog spoja.

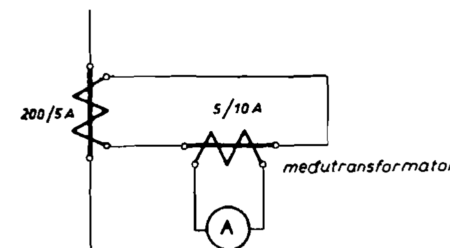
Dinamička granična struja (I_{din}) strujnog transformatora tjemena je vrijednost koju može strujni transformator izdržati (pri kratkospojenom sekundarnom namotu), a da ga ne oštete sile koje uzrokuje ta struja. Ako se radi o štapnom transformatoru koji ima primarno samo jedan vodič, njegova dinamička granična struja praktički je neizmjerno velika. Ostali strujni transformatori izvode se za dinamičke granične struje od 200 do 250 x I_{n1}. Tačan podatak može se naći u listama tvornica.

Prilikom izbora strujnih transformatora potrebno je kontrolirati da li će odabrani transformator izdržati struje kratkog spoja. Termička granična struja mora biti veća od struje mjerodavne za ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkog spoja, dok dinamička granična struja odabranog strujnog transformatora mora biti veća od udarne struje kratkog spoja.

f) Strujni međutransformatori

Postavljanjem međutransformatora (primjer je prikazan na sl. 4.138) moguće je promijeniti prijenosni omjer. Postavljanje međutransformatora dolazi u obzir za neka mjerenja (mjerenja zbroja snaga i zbroja energije) i za neke zaštitne uređaje (diferencijalna zaštita), te u slučajevima kad se želi zaštititi mjerni instrument od prevelikih struja, koje su posljedica visokog strujnog višekratnika glavnog strujnog transformatora.

Postavljanjem međutransformatora dobivamo kaskadni spoj strujnih transformatora, pa glavni strujni transformator treba da pokrije i cijeli vlastiti potrošak međutransformatora. Pogreške glavnog transformatora i međutransformatora zbrajaju se, pa ako svaki za sebe ima klasu tač-



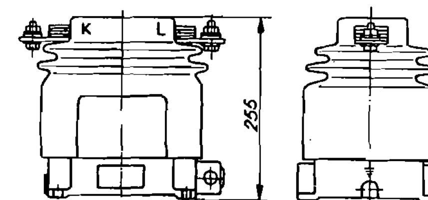
Slika 4.138. Primjer spoja strujnog međutransformatora

nosti 0,5, cijeli slog ima klasu tačnosti 1. Strujni višekratnik sloga (na sekundarnoj strani međutransformatora) niži je i od onog strujnog transformatora koji ima manji strujni višekratnik. Ako glavni strujni transformator ima $n = 10$, a međutransformator $n = 4$, slog će imati $n < 4$, jer se pogreške zbrajaju.

g) Izvedbe strujnih transformatora

Strujni transformatori izvode se kao suhi, zamkasti, štapni i malouljni.

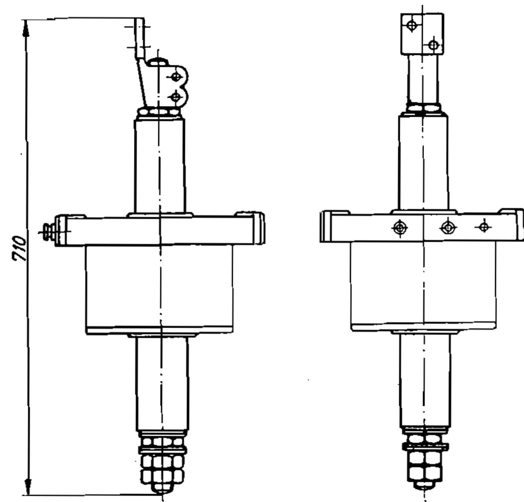
Glavna je izolacija suhih strujnih transformatora (sl. 4.139) naročito oblikovan porculanski izolator. Sekundarni namot sa željeznom jezgrom smješten je u poprečnoj rupi. Malih je dimenzija i može se montirati u bilo kojem položaju. Izrađuje se za nazivne napone do 35 kV, ali samo za unutarnju montažu.



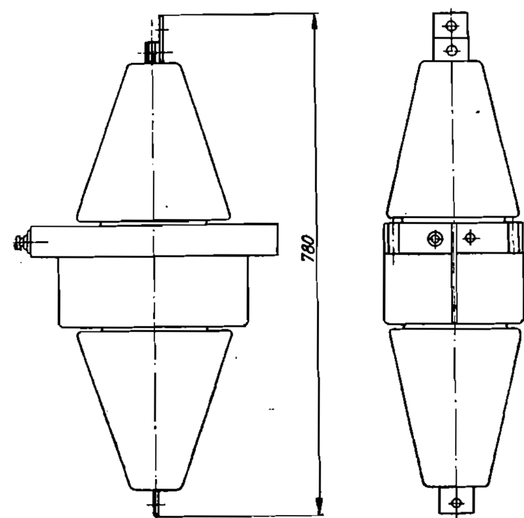
Slika 4.139. Suhi strujni transformator za nazivni napon 10 kV (proizvod »Rade Končar«)

Primarni namot zamkastih strujnih transformatora namata se kroz dva provodna izolatora. Zbog velikih mehaničkih naprezanja koja se javljaju unutar zamke kada kroz nju teku struje kratkog spoja, provodni se izolatori pojačavaju metalnim konstrukcijama na glavama i u sredini. Zamkasti strujni transformatori ugrađuju se tamo gdje je nepo-

godna štapna izvedba radi malih primarnih struja ili gdje je potrebna mogućnost prespajanja na primarnoj strani. Za male primarne struje štapni strujni transformator ima i malo amperzavoja, pa su nepogodni ako je potrebna veća nazivna snaga (4.202). Prespajanje na primarnoj

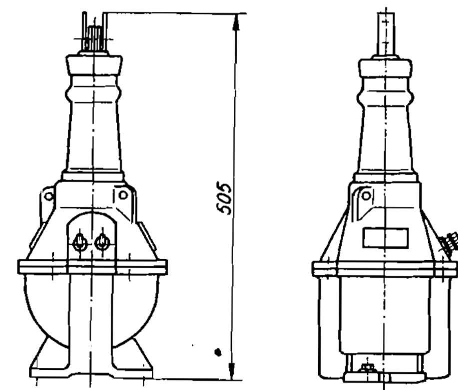


Slika 4.140. Zamkasti strujni transformator za nazivni napon 10 kV (proizvod »Rade Končar«)



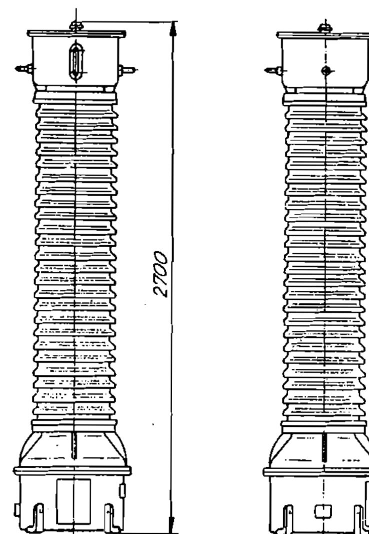
Slika 4.141. Štapni strujni transformator za nazivni napon 35(30) kV (proizvod »Rade Končar«)

strani zamkastih strujnih transformatora moguće je izvesti, ali se pojavljuju izvjesne poteškoće jer se — radi ulaza na jednoj, a izlaza na drugoj strani — primarni namot ne može podijeliti na dva jednaka dijela (Lit. 48). Zamkasti strujni transformator može se montirati u bilo kojem položaju, a izvodi se za napone do 35 kV.

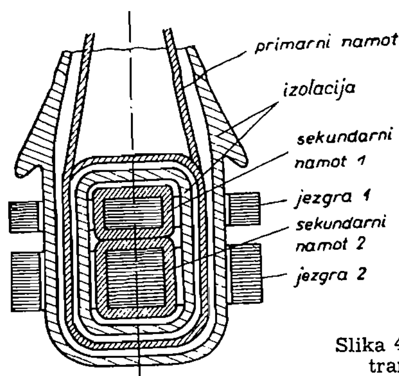


Slika 4.142. Malouljni strujni transformator za nazivni napon 10 kV (proizvod »Rade Končar«)

Štapni strujni transformatori (sl. 4.140. i 4.141) upotrebljavaju se gdjegod je to moguće s obzirom na veličinu struje, radi praktički neizmjerne velike dinamičke granične struje. Normalno se, naime, takvi transformatori izvode za primarne nazivne struje od 100 A i više. Budući da je primarni

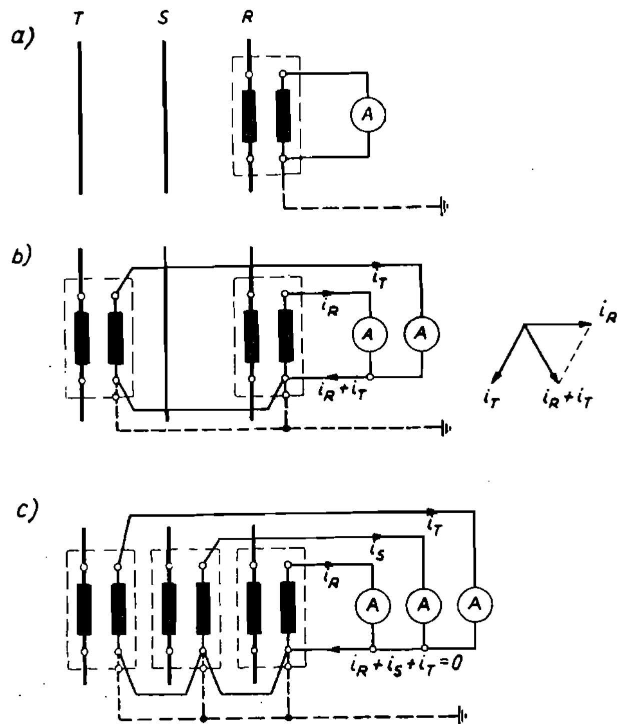


Slika 4.143. Malouljni strujni transformator za nazivni napon 220 kV (proizvod »Rade Končar«)



Slika 4.144. Primjer izvedbe strujnog transformatora s dvije jezgre

namot izveden od samo jednog vodiča, štapni transformatori mogu se prespajati samo sekundarno, a mogu se ugraditi u bilo kojem položaju. Normalno se izvode za napone do 35 kV.



Slika 4.145. Shema spoja strujnih transformatora: za slučaj (a) mjerenja u jednoj fazi, (b) u dvije faze i (c) u sve tri faze

U malouljnim strujnim transformatorima oba izvoda prolaze paralelno kroz zajednički izolator. Za niže napone do 35 kV izvode se s metalnim kotlom u kojemu su smješteni namoti i željezna jezgra (sl. 4.142), dok se za više napone (60 kV i više) i namoti i jezgra nalaze u izolatoru (sl. 4.143), dok su u novijim izvedbama namoti i jezgra smješteni u kotlu na dnu izolatora.

Za unutarnju montažu i za napone do 35 kV izvode se strujni transformatori od umjetnih smola.

Vrlo često se izvode strujni transformatori sa dvije jezgre, koje imaju različite mjerne karakteristike (najčešće različite strujne višekratnike). Obje jezgre imaju zajednički primarni namot (sl. 4.144).

h) Uzemljenje strujnih transformatora

Metalno kućište i jednu od sekundarnih stezaljki strujnog transformatora treba neposredno uzemljiti, da bi se poslužno osoblje zaštitilo u slučaju spoja između primarnog i sekundarnog namota. Obično se na svim strujnim transformatorima u rasklopnom postrojenju uzemljuje ista sekundarna stezaljka, i to ona koja se ne nalazi na strani sabirnica.

Ovdje treba napomenuti da se kod nas primarne stezaljke strujnog transformatora označavaju velikim slovima *K* i *L*, a sekundarne malim slovima *k* i *l*. IEC preporuča oznake P_1 i P_2 za primarne, a S_1 i S_2 za sekundarne stezaljke.

Na sl. 4.145. prikazani su spojevi strujnih transformatora za mjerenje struje u jednoj, dvije i sve tri faze. U svim slučajevima jedna od sekundarnih stezaljki spojena je na stezaljku za uzemljenje, koje su preko zajedničkog voda uzemljene.

C. Naponski mjerni transformatori

a) Djelovanje i karakteristike

Naponski mjerni transformator izveden je kao normalan transformator snage koji je priključen paralelno s potrošačima na praktički konstantan napon. Osnovna je razlika između njega i transformatora snage da je relativno slabo opterećen, kako bi pogreška mjerenja ostala malena. Struja magnetiziranja ovisna je samo o primarnom naponu.

Prijenosni omjer naponskog transformatora definiran je omjerom nazivnog primarnog i nazivnog sekundarnog napona. Nazivni primarni napon jednak je ili linijskom nazivnom naponu mreže (npr. 110 kV) — ako se radi o dvopolno izoliranom naponskom transformatoru — ili faznom nazivnom naponu (npr. $110/\sqrt{3}$ kV, ali i tada transformator mora biti dimenzioniran da može trajno izdržati napone 110 kV) — ako se radi o jednopolno izoliranom naponskom transformatoru. U prvom slučaju sekundarni nazivni napon uvijek je 100 V, a u drugom je uvijek $100/\sqrt{3}$ V.

Naponska pogreška naponskog transformatora definirana je analogno strujnoj pogrešci strujnog transformatora. Određena je relacijom

$$\Delta u = \frac{K U_2 - U_1}{U_1} 100\% \qquad \ldots (4.208)$$

gdje je K prijenosni omjer. Kutna pogreška definirana je analogno istoimenoj pogrešci strujnog transformatora.

I sada je klasa tačnosti jednaka naponskoj pogrešci u procentima pri naponu koji je u granicama od 0,8 U_{n1} do 1,2 U_{n1}. Prema njemačkim propisima razlikujemo slijedeće klase tačnosti naponskih transformatora: 0,1; 0,2; 0,5; 1 i 3. Dopuštene kutne pogreške su redom prema klasi: 5′, 10′, 20′ i 40′, dok za klasu 3 nije određena dopuštena kutna pogreška.

U pripremi su preporuke IEC o naponskim transformatorima, koje predviđaju iste klase tačnosti kao i njemački propisi.

Nazivna snaga (u VA) naponskih transformatora jest snaga kojom se može opteretiti transformator, a da pogreška ne pređe dopuštenu granicu. Pri većim opterećenjima pogreška naponskog transformatora raste s povećanjem opterećenja, pa za dvostruko opterećenje može doseći i tri puta veću pogrešku. Granična termička snaga naponskog transformatora jest ona snaga kojom se transformator može trajno opteretiti, a da temperatura ne pređe dopuštenu granicu. Ta snaga je obično nekoliko puta veća od nazivne snage naponskog transformatora. Potrebna nazivna snaga određuje se prema potrošku instrumenata i releja koji će biti priključeni na sekundarnu stranu naponskog transformatora. Informativni podaci o potrošku navedeni su u tab. 4.18.

TABLICA 4.18.

Potrošnja instrumenata i releja koji se priključuju na naponski transformator

Mjerni instrument ili relej	Potrošak VA
Pokazni voltmetar	1 ... 10
Registracioni voltmetar	1 ... 10
Pokazni vatmetar, po fazi	1,5 ... 5
Registracioni vatmetar, po fazi	4 ... 13
Djelatno ili jalovo brojilo, po fazi	2 ... 3
Mjerilo frekvencije	1 ... 1,5
Sinhronoskop	10
Podnaponski relej	1 ... 7
Usmjereni relej	1 ... 8
Distantni relej	1

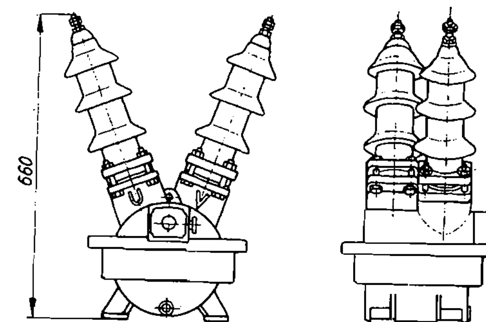
Naponski transformatori određeni su, dakle, slijedećim karakteristikama: prijenosnim omjerom, klasom tačnosti i nazivnom snagom.

b) Izvedbe naponskih transformatora

Razlikujemo dva tipa naponskih transformatora: dvopolno izolirani i jednopolno izolirani.

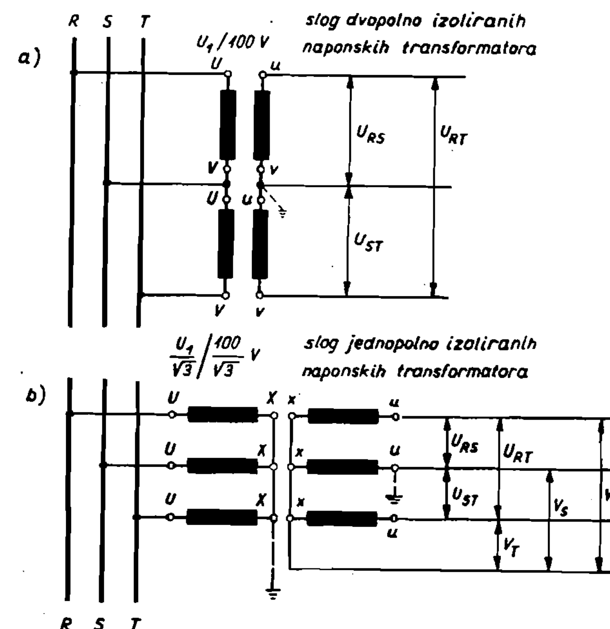
Dvopolno izolirani naponski transformator (sl. 4.146) ima dva visokonaponska priključka, dok jednopolno izolirani (sl. 4.150) ima samo jedan visokonaponski priključak, jer drugi je kraj visokonaponskog namota spojen s metalnim kućištem i uzemljen.

Oba tipa naponskih transformatora mogu se upotrijebiti za mjerenje u trofaznom sistemu i to spajanjem u slog naponskih transformatora. Da bismo ostvarili slog naponskih transformatora, potrebna su dva dvopolno



Slika 4.146. Malouljni dvopolno izolirani naponski transformator za nazivni napon 35 (30) kV (proizvod »Rade Končar«)

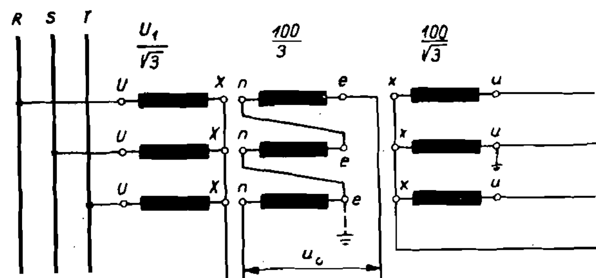
izolirana (sl. 4.147a), odnosno tri jednopolno izolirana (sl. 4.147b) naponska transformatora. U prvom slučaju mogu se mjeriti samo linijski, a u drugom i linijski i fazni naponi.

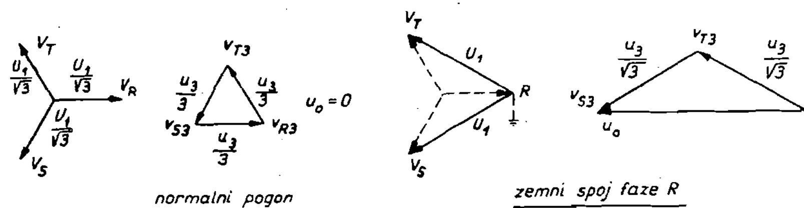


Slika 4.147. Slogovi naponskih transformatora

Slog jednopolno izoliranih naponskih transformatora može poslužiti i za mjerenje napona nul-tačke prema zemlji. U tu svrhu potreban je i tercijarni namot na svakom naponskom transformatoru, koji se spajaju u trokut (sl. 4.148). Na krajevima trokuta vlada napon koji je proporcionalan naponu nul-tačke. Da bi bila moguća upotreba voltmetra s područjem mjerenja do 100 V, prijenosni omjer takvog naponskog transformatora treba da bude

$$\frac{U_1}{\sqrt{3}} \;/\; \frac{100}{\sqrt{3}} \;/\; \frac{100}{3}\ \mathrm{V}$$

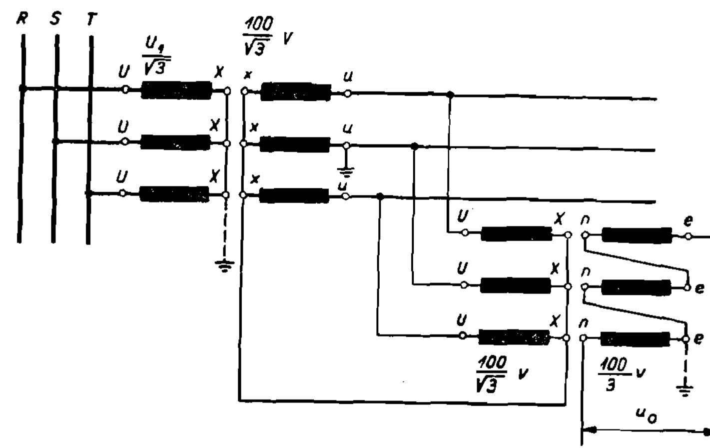




Slika 4.148. Shema spoja sloga od tri jednopolno izolirana naponska transformatora s tercijarnim namotom. Naponi primarnog i tercijarnog namota u slučaju zemnog spoja faze R

Nazivni napon tercijarnog namota treba da bude 100/3 V. Na sl. 4.148. prikazani su primarni naponi i naponi na tercijarnom namotu. U normalnom pogonu zbroj napona na tercijarnom namotu, koji je spojen u trokut, jednak je nuli ($u_o = 0$). U slučaju zemnog spoja faze R, naponi će na dvije zdrave faze porasti na iznos linijskog napona, pa će zbroj napona na tercijarnom namotu iznositi upravo trostruko (u_3) od napona jedne faze tercijarnog namota $\left(\frac{u_3}{3}\right)$ u normalnom pogonu.

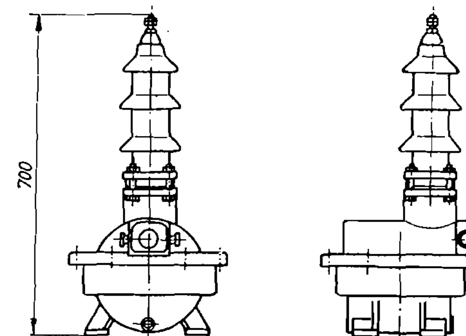
Ukoliko ne postoji tercijarni namot, mjerenje napona u_o moguće je ostvariti upotrebom pomoćnog transformatora, prema shemi spoja prikazanoj na sl. 4.149.



Slika 4.149. Shema spoja pomoćnog naponskog transformatora za mjerenje napona nul-tačke za slučaj kad ne postoji tercijarni namot na glavnom naponskom transformatoru

Mjesto sloga od dva dvopolno izolirana ili tri jednopolno izolirana transformatora može se upotrijebiti i trofazni naponski transformator sa pet stupova, koji omogućuju mjerenja kao sa tri jednopolno izolirana transformatora s tercijarnim namotom. Za mjerenje napona nul-tačke potreban je poseban namot na vanjskim stupovima, u kojemu nema napona u normalnom pogonu, jer je zbroj tokova jednak nuli. U slučaju nesimetrije napona, kroz četvrti i peti stup zatvara se tok koji u njima inducira napon proporcionalan naponu nul-tačke. Takvi transformatori danas se sve rjeđe upotrebljavaju.

Suhi naponski transformatori izvode se za napone do 3 kV, dok se za napone do 35 kV upotrebljavaju bilo uljni, bilo malouljni (sl. 4.146. i 4.150) naponski transformatori. Prednost treba dati malouljnim trans-

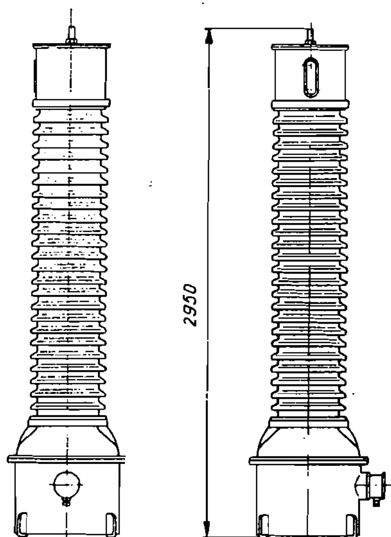


Slika 4.150. Malouljni jednopolno izolirani naponski transformator za nazivni napon 35 (30) kV (proizvod »Rade Končar«)

formatorima radi manje opasnosti (zapaljenje ili eksplozija) u slučaju kvara. Za unutarnju montažu, a za napone do 35 kV izvode se naponski transformatori s izolacijom od umjetnih smola.

Za napone do 35 kV upotrebljavaju se i jednopolno i dvopolno izolirani transformatori. Za napone više od 35 kV sve veći dio troškova za izgradnju naponskog transformatora otpada na izolator, pa je za te napone ekonomičnija upotreba sloga od tri jednopolno izolirana (potrebna tri izolatora), nego sloga od dva dvopolno izolirana transformatora (potrebna četiri izolatora).

Radi toga se naponski transformatori za 110 kV i više napone izvode samo kao jednopolno izolirani (sl. 4.151). Svi aktivni dijelovi smješteni su u izolator napunjen uljem, dok metalna glava izolatora služi kao uljni konzervator. Na glavi izolatora obično se nalaze dvije stezaljke, između kojih je spoj s primarnim namotom.



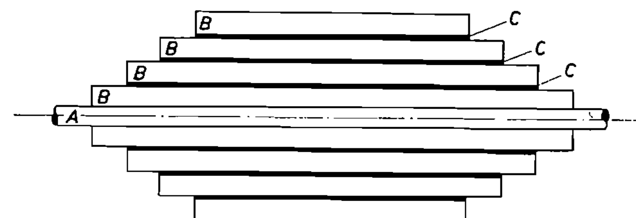
Slika 4.151. Malouljni jednopolno izolirani naponski transformator za nazivni napon 220 kV (proizvod »Rade Končar«)

Normalno se naponski transformatori izvode sa zatvorenom željeznom jezgrom, ali u novije vrijeme za visoke napone upotrebljavaju se mjerni naponski transformatori s otvorenom jezgrom. U transformatorima s otvorenom jezgrom magnetski tok zatvara se kroz zrak. Jezgra ima oblik stupa, a najčešće je složena od radijalno postavljenih limova. Otvorenom jezgrom znatno se smanjuju dimenzije transformatora i pojednostavnjuje izoliranje, jer otpada izolacija prema jarmu. Zbog malog promjera jezgre s namotima cijeli aktivni dio transformatora može se smjestiti u porculanski izolator, koji je tek nešto veći od običnog potpornog izolatora za

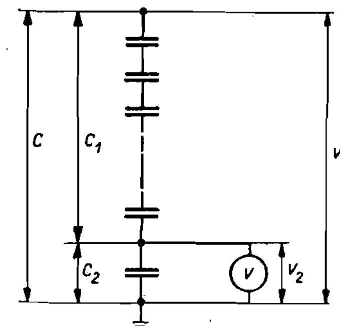
isti napon. Otvorena jezgra uzrokuje veću struju magnetiziranja. Pogreška koju izaziva struja magnetiziranja zbog padova napona može se otkloniti prikladnim kompenzacionim spojevima.

c) Kapacitivni naponski transformatori

Za mjerenje napona, mjesto naponskih transformatora opisanih u odjeljcima a) i b) ovog poglavlja, mogu se upotrijebiti provodni izolatori, koji među slojevima izolacije imaju metalne cilindre, a predstavljaju obloge kondenzatora spojenog u seriju (sl. 4.152), ili pak kondenzator predviđen za priključke visokofrekventnog uređaja. Priključkom voltmetra na dio kondenzatorâ spojenih u seriju (sl. 4.153) moguće je mjerenje na-



Slika 4.152. Shema provodnog izolatora. (A) vodič, (B) izolacija, (C) metalni umeci



Slika 4.153. Priključak voltmetra na dio kondenzatora

pona koji djeluje na sve kondenzatore spojene u seriju. Upotrebom elektrostatskog voltmetra, koji ne uzima struju, za omjer napona možemo postaviti

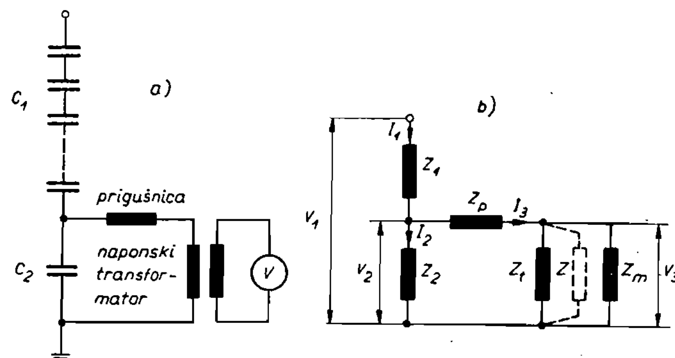
$$\frac{V_1}{V_2} = 1 + \frac{C_2}{C_1} \qquad \ldots (4.209)$$

što slijedi iz jednakosti struja kroz kapacitete C_1 i C_2. Upotrebom mjernog instrumenta, koji uzima neku snagu, omjer napona postaje ovisan o veličini priključene impedancije, kako će kasnije biti pokazano. Da se ta ovisnost što više eliminira, priključuje se prigušnica koja je u rezonanciji s kapacitetom C_2, a da se ostvari mogućnost upotrebe instrume-

nata i releja za napon 100 V, postavlja se i naponski transformator, čiji je primarni namot spojen na stezaljke kapaciteta C_2. Opisana shema spoja prikazana je na sl. 4.154a, dok je ekvivalentna shema spoja prikazana na sl. 4.154b. Impedancije Z_t (poprečna impedancija naponskog transformatora, obrnuto proporcionalna struji magnetiziranja) i Z_m (impedancija priključenih mjernih instrumenata) prikazane su u ekvivalentnoj shemi nadoknadnom impedancijom Z, koja je

$$Z = \frac{Z_t Z_m}{Z_t + Z_m} \qquad \ldots (4.210)$$

Impedancija Z_p predstavlja zbroj impedancije prigušnice i impedancije naponskog transformatora.



Slika 4.154. Shema spoja mjerenja s kapacitivnim djeliteljem napona (a) i ekvivalentna shema spoja (b)

Uzevši u obzir ekvivalentnu shemu, možemo postaviti

$$I_1 = I_2 + I_3 \qquad \ldots (4.211a)$$

$$V_1 = I_1 Z_1 + I_2 Z_2 \qquad \ldots (4.211b)$$

$$V_2 = I_3 Z_p + V_3 = I_2 Z_2 \qquad \ldots (4.211c)$$

$$V_3 = I_3 Z \qquad \ldots (4.211d)$$

Uvrštavanjem (4.211a) u (4.211b) dobivamo

$$V_1 = (I_2 + I_3) Z_1 + I_2 Z_2 \qquad \ldots (4.212a)$$

dok je iz (4.211c) i (4.211d)

$$I_2 = \frac{V_3}{Z_2}\left(\frac{Z_p}{Z} + 1\right) \qquad \ldots (4.212b)$$

$$I_3 = \frac{V_3}{Z} \qquad \ldots (4.212c)$$

Odatle dobivamo za omjer napona mreže (V_1) i napona (V_3) koji djeluje na mjerni instrument

$$\frac{V_1}{V_3} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{1}{Z}\left(Z_1 + Z_p + \frac{Z_1}{Z_2} Z_p\right) \qquad \ldots (4.213)$$

Zanemarimo li djelatne otpore, možemo postaviti $Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1}$, $Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}$ i $Z_p = j\omega L_p$, pa (4.213) glasi

$$\frac{V_1}{V_3} = 1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{Z}\left(\frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_p + \frac{C_2}{C_1} j\omega L_p\right) \qquad \ldots (4.214)$$

Ako se želi da omjer napona bude ovisan samo o kapacitetima C_1 i C_2 (dakle o mjestu priključka uređaja za mjerenje), mora se postići da izraz u zagradi bude jednak nuli. Iz tog uvjeta slijedi da mora biti

$$\omega L_p = \frac{1}{\omega (C_1 + C_2)} \qquad \ldots (4.215)$$

Naravno da osim induktiviteta i kapaciteta postoje i djelatni otpori, pa će i uz postignuti uvjet (4.215) postojati izvjesna ovisnost omjera napona o impedanciji Z. Ako je, međutim, uvjet (4.215) ispunjen za nazivnu frekvenciju mreže, pogreška omjera napona pojavljivat će se pri svakom odstupanju od nazivne frekvencije. Tačnost mjerenja ovisna je, dakle, o frekvenciji mreže.

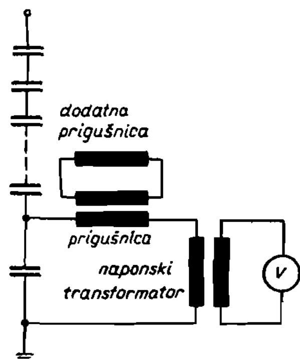
Drugi izvor pogreške, koji ne utječe na induktivni (obični) naponski transformator, jest utjecaj promjene temperature na kondenzator. Promjenom temperature mijenja se vrijednost djelomičnih kapaciteta, pa radi toga opet nije ispunjena relacija (4.215). Nejednolikim ugrijavanjem mijenja se C_1/C_2, pa i to djeluje na omjer napona, što izaziva daljnju pogrešku mjerenja.

Naravno da u kapacitivnom naponskom transformatoru postoje i isti uzroci pogrešaka kao u običnom naponskom transformatoru.

U pogonu se kapacitivni naponski transformator drukčije vlada od induktivnog naponskog transformatora. Ulaz prenaponskog vala u induktivni naponski transformator može dovesti do znatnih oštećenja. Nasuprot tome, u kapacitivnom naponskom transformatoru strmina prenaponskog vala smanjuje se zbog nabijanja parcijalnih kapaciteta. Radi toga je raspodjela napona uzduž kondenzatora približno linearna, pa su parcijalni kondenzatori jednako napregnuti. Kapacitivni naponski transformatori osjetljiviji su na prenapone pogonske frekvencije, do kojih dolazi radi kratkih ili zemnih spojeva, odnosno radi uklapanja ili isklapanja u mreži. Zbog tih prenapona može doći do rezonancije u krugu mjerenja. Da se to smanji ili spriječi, obično se postavljaju dodatni nelinearni elementi u strujni krug (Lit. 54 i 55).

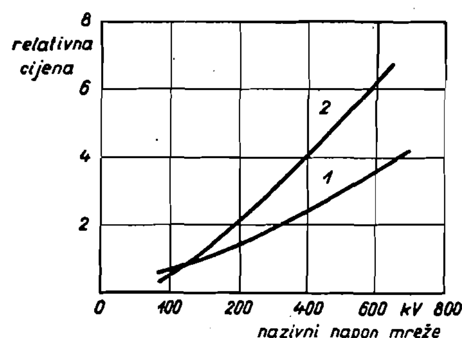
Znatna naprezanja za svaki naponski transformator izaziva kratak spoj na sekundarnoj strani. U induktivnom naponskom transformatoru, tada dolazi do povišenja temperature radi preopterećenja strujom. Efikasna zaštita su osigurači. U slučaju kratkog spoja na sekundarnoj strani

kapacitivnog naponskog transformtaora dolazi — radi velikih struja — do znatnog povišenja napona u rezonantnom krugu, pa ako nisu poduzete posebne zaštitne mjere, to dovodi do oštećenja parcijalnog kondenzatora C_2 (sl. 4.154a). Zaštita se ostvaruje postavljanjem dodatne prigušnice (sl. 4.155), koja ima krivulju magnetiziranja s izrazitim koljenom.



Slika 4.155. Shema priključka dodatne prigušnice za kapacitivni naponski transformator

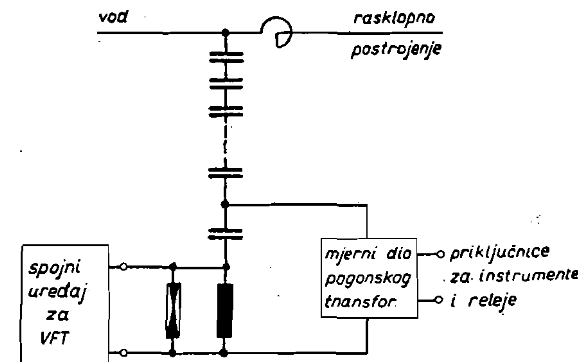
Kad struja postigne određenu vrijednost, dodatna prigušnica postaje zasićena. To dovodi do promjene induktiviteta u krugu, pa radi toga više niti ne postoji rezonancija u krugu kapacitet—prigušnica. Na taj način sprečava se povišenje napona na parcijalnom kapacitetu C_2.



Slika 4.156. Cijena kapacitivnih (1) i induktivnih (2) naponskih transformatora u ovisnosti o nazivnom naponu mreže

Kapacitivni naponski transformator za vrlo visoke napone jeftiniji je od induktivnog naponskog transformatora (sl. 4.156). Relativno visoka cijena kapacitivnim naponskim transformatorima za napone niže od 110 kV i — u usporedbi s induktivnim naponskim transformatorima — mali porast cijene s porastom nazivnog napona, uvjetovano je činjenicom da su troškovi za mjerni dio kapacitivnog mjernog transformatora praktički neovisni o naponu, dok su troškovi za kondenzatorski dio proporcionalni naponu. Uzrok relativno bržem porastu cijene induktivnim naponskim transformatorima s porastom napona jest u činjenici da troškovi za izolaciju primarnog namota, kao i ukupna težina transformatora, rastu brže nego proporcionalno s povećanjem napona.

Upotreba kondenzatora za priključak visokofrekventne telefonije istodobno i kao kondenzatora za mjerenje napona (shema spoja prikazana na sl. 4.157) ima opravdanje naročito u slučajevima kad je potrebno mjerenje napona samo u jednoj fazi, jer se prijenos visokofrekventnih signala vrši preko jedne faze.



Slika 4.157. Shema priključka kapacitivnog naponskog transformatora na kondenzator za visokofrekventnu telefoniju

U slučaju nagle promjene primarnog napona može doći do pojave dodatnih napona u sekundarnom krugu, što može dovesti do pogrešnog djelovanja releja (usmjereni, distantni releji), pogotovo ako se radi o brzim relejima.

4.5. TRANSFORMATORI SNAGE

A. Osnovni podaci transformatora

Osnovni podaci transformatora snage jesu: prijenosni omjer, nazivna snaga, spoj transformatora, napon kratkoga spoja, mogućnost promjene prijenosnog omjera i način hlađenja.

Prijenosni omjer jest omjer zavoja primarnog i sekundarnog namota transformatora. Taj je omjer praktički jednak omjeru primarnog i sekundarnog napona transformatora u praznom hodu. Prijenosni omjer se navodi kao omjer nazivnih napona primarnog i sekundarnog napona, pa su na taj način istodobno navedeni podaci o prijenosnom omjeru i nazivnim naponima. Nazivni naponi za trofazne napone znače uvijek linijske napone.

S obzirom na smjer energije, razlikujemo silazne i uzlazne transformatore. U silaznom transformatoru energija višeg napona transformira

se na niži napon, dok je u uzlaznom smjer energije od nižeg na viši napon. Da bi se kompenzirao pad napona u transformatoru i djelomično u mreži, normalno se ne izvode transformatori prijenosnog omjera koji tačno odgovara nazivnim naponima mreža (npr. 110/10 kV), već se obično za nazivni napon sekundarnog namota odabire onaj koji je za 5% veći od nazivnog napona mreže. Pod sekundarnim naponom ovdje razumijevamo napon na koji se transformira energija. Tako se npr. silazni transformator gradi za prijenosni omjer 110/10,5 kV, a uzlazni — koji povezuje mreže istih nazivnih napona — za prijenosni omjer 115,5/10 kV. U nekim slučajevima, međutim, isti transformator može služiti i kao uzlazni i kao silazni, kad povremeno dolazi do promjene smjera energije radi energetskih prilika u mreži. U tim slučajevima izbor prijenosnog omjera ovisi o naponskim prilikama u mrežama koje transformator povezuje.

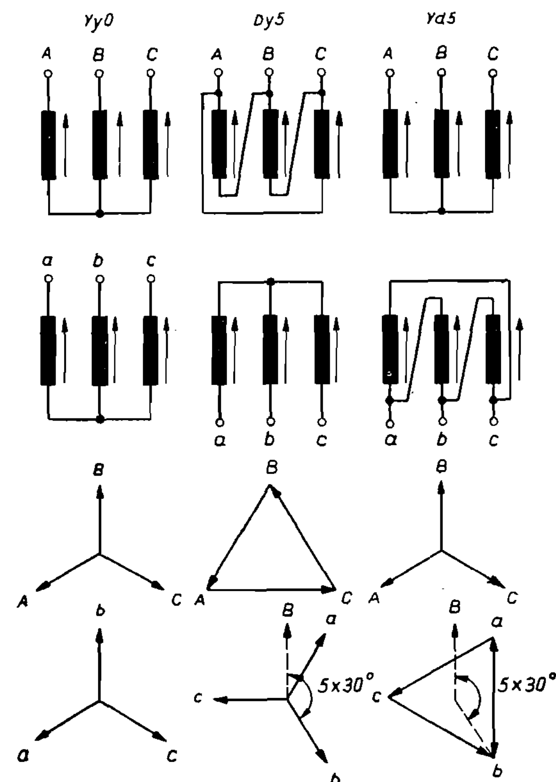
Za prijenosni omjer tronamotnih transformatora vrijedi analogno sve ono što vrijedi za dvonamotne transformatore.

Nazivna snaga transformatora jest prividna snaga za koju je dimenzioniran transformator, a dobiva se iz izraza

$$S_n = \sqrt{3}\, I_{2n}\, U_{2n} \qquad \ldots (4.216)$$

gdje su I_{2n} nazivna sekundarna struja, a U_{2n} nazivni sekundarni napon. Ta definicija, iako se nalazi u većini propisa, nije u skladu s onom koja se normalno upotrebljava za definiranje nazivne snage strojeva. Nazivna snaga strojeva definirana je kao izlazna snaga, pa bi izlaznu snagu transformatora trebalo određivati pomoću sekundarnog napona pri nazivnoj struji (kako je to npr. predviđeno u talijanskim propisima), a ne pomoću sekundarnog napona u praznom hodu. Sekundarni napon opterećenog transformatora ovisi o faktoru snage, pa se nazivna snaga može definirati samo pri određenom faktoru snage opterećenja. Za tronamotne transformatore potrebno je, međutim, poznavati nazivnu snagu svakog namota. Ako su npr. nazivne snage: primarnog namota 60 MVA, sekundarnog 40 MVA, a tercijarnog 20 MVA, transformirana snaga među dva namota ograničena je onim namotom koji ima manju nazivnu snagu. U navedenom primjeru može se između primarnog i sekundarnog namota transformirati snaga od 40 MVA, a između primarnog i tercijarnog, kao i između sekundarnog i tercijarnog, od 20 MVA. Prilikom izbora nazivnih snaga za pojedine namote treba u nekim slučajevima (priključak sinhronog kompenzatora na tercijarni namot) voditi računa i o faktoru opterećenja na pojedinim namotima, te o istodobnosti opterećenja pojedinih namota.

Za vezu između visokonaponskih mreža najčešće se upotrebljavaju slijedeći spojevi transformatora: YyO, Dy5 i Yd5 (sl. 4.158). Spoj YyO upotrebljava se za transformatore manjih snaga, pogotovo u slučaju kad su obje nul-tačke uzemljene bilo neposredno, bilo preko prigušnice. Takav spoj transformatora može se upotrijebiti i kad su obje nul-tačke izolirane prema zemlji. Ako je, međutim, potrebno uzemljiti nul-tačku samo na jednoj strani, upotrijebit ćemo transformator spoja Dy5 ili Yd5, u ovisnosti o tomu koja nul-tačka treba da bude uzemljena. Ako se u takvom slučaju upotrijebi transformator u spoju Yy, mora postojati i tercijarni namot spojen u trokut, jer bi inače nulta reaktancija bila visoka, pa bi uzemljenje nul-tačke bilo neefikasno. Transformator u spoju Yd5 naročito je pogodan za vezu elektrane s mrežom, bilo da su generatori spojeni na sabirnice generatorskog napona, bilo da su u bloku s transformatorom spojeni na sabirnice. Generator je povoljno spojiti na namot spojen u trokut, jer na taj način treći nadval ne prelazi u mrežu.



Slika 4.158. Sheme spoja i vektorski dijagrami najčešće upotrebljavanih spojeva dvonamotnih transformatora

Danas se sve češće upotrebljavaju tronamotni transformatori, pogotovo kad se radi o vrlo visokim naponima i kad su u transformatorskoj stanici tri različita napona. U tom slučaju se obično izvodi spoj Yy0d5 (što znači da su namoti najvišeg i srednjeg napona spojeni u zvijezdu, dok je tercijarni namot spojen u trokut). Na taj način moguće je uzemljenje obiju nul-tačaka višeg napona, jer se normalno uzemljuju mreže višeg napona. Spomenuti spoj upotrebljava se i kad je jedna nul-tačka uzemljena, te kad je predviđeno postavljanje sinhronog kompenzatora, koji se tada priključuje na namot spojen u trokut. Tronamotni transformatori mogu doći u obzir u elektranama, npr. za priključak vlastitog potroška (na treći namot) ili za transformaciju energije dvaju generatora preko jednog transforma-

tora. U prvom slučaju dolazi u obzir spoj Yd5y0, a u drugom Yd5d5. U oba slučaja generatori su priključeni na namot spojen u trokut. Transformacija energije dvaju generatora preko jednog transformatora dolazi u obzir ako se radi o priključku na mrežu vrlo visokog napona. Sheme spoja i vektorski dijagram spomenutih tronamotnih transformatora prikazani su na sl. 4.159.

Napon kratkog spoja kreće se normalno između 3,5 i 13% (tab. 2.3). Manji napon kratkog spoja imaju transformatori manje nazivne snage i nižeg napona.

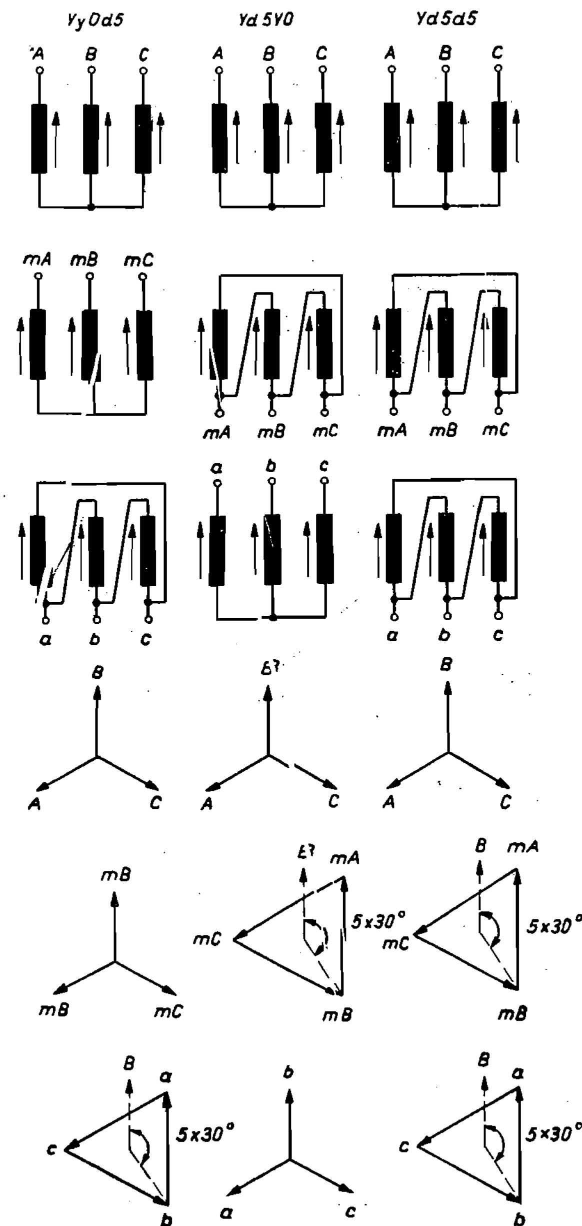
Promjenom broja zavoja bilo na primarnom bilo na sekundarnom namotu transformatora mijenja se prijenosni omjer, pa to omogućuje i promjenu napona na sekundarnoj strani (s obzirom na smjer energije) transformatora. Razlikujemo transformatore s otcjepima i regulacione transformatore.

U transformatorima s otcjepima prijenosni se omjer može mijenjati samo ako transformator nije pod naponom, dakle za svaku promjenu prijenosnog omjera potrebno ga je isključiti. Transformatori s otcjepima izvode se obično sa tri položaja preklopke (npr. 30 kV ± 5%/10,5 kV, pa je moguće ostvariti prijenosni omjer 31,5/10,5 kV, 30/10,5 kV i 28,5/10,5 kV). U nekim slučajevima izvode se transformatori i sa pet položaja preklopke (npr. 30 kV ± 2 × 5%/10,5 kV). Uobičajeni su otcjepi ± 4% ili ± 5%, ali se grade i transformatori s otcjepima ± 2,5% i ± 7,5%. Izvedba otcjepa s obzirom na konstrukciju transformatora nepoželjna je (radi pojave aksijalnih sila među namotima kao posljedica nesimetrije namota, radi potrebe jakog izoliranja otcjepa da bi se spriječile posljedice reflektiranja vala prenapona na otvorenim otcjepima, te radi često teško izvedivih izvoda otcjepa iz namota), pa je otcjepe potrebno izbjegavati, ako nisu neophodno potrebni.

U regulacionom transformatoru, međutim, može se prijenosni omjer mijenjati i za vrijeme pogona, dakle i u slučaju kad je transformator opterećen, što znači da se prijenosni omjer može mijenjati a da se ne prekida pogon. Takav transformator izvodi se s većim brojem otcjepa, pa npr. prijenosni omjer 110 kV ± 10 × 1,5%/31,5 kV znači da postoji 21 mogući položaj regulacione sklopke i to u skokovima od po 1,65 kV na visokonaponskoj strani. Prema tome, za navedeni transformator mogući su prijenosni omjeri 126,5/10,5 kV, 124,85/10,5 kV, ... 95,15/10,5 kV i 93,5/10,5 kV. Regulacioni transformatori grade se najviše za regulaciju u granicama od ± 10 do ± 20%. Napon jednog stepena iznosi oko 1,5 do 2%. Kakav opseg regulacije treba odabrati ovisi o prilikama u mreži.

Regulaciona sklopka može se u principu smjestiti ili na stranu višeg ili na stranu nižeg napona. Obično se postavlja na stranu višeg napona, jer su tamo struje manje, pa je regulaciona sklopka lakša i jeftinija. U principu je povoljnije da je namot s otcjepima smješten na strani na kojoj se više mijenja napon, kako ne bi dolazilo do povišenja indukcije u željezu.

Regulacioni transformatori najčešće se izvode kao jedna jedinica, u kojoj je smještena i regulaciona sklopka. Ima, međutim, izvedaba u dvije jedinice, od kojih je jedna dvonamotni transformator fiksnog prijenosnog omjera, a druga transfomator u štednom spoju, s regulacionom sklopkom pomoću koje se vrši promjena prijenosnog omjera. S obzirom na sigurnost pogona izvedba u dvije jedinice u prednosti je pred drugom izvedbom, jer



Slika 4.159. Sheme spoja i vektorski dijagrami najčešće upotrebljavanih spojeva tronamotnih transformatora

u slučaju kvara u transformatoru s regulacionom sklopkom dvonamotni transformator ostaje u pogonu.

Za generatore u hidroelektranama, koji spajaju generatore s mrežom, nije potrebno predvidjeti regulacione transformatore, jer se promjena napona može postići regulacijom napona na generatoru, dok upotreba transformatora s otcjepima nije iz već navedenih razloga preporučljiva. U termoelektranama, međutim, ekonomičnije je ostvariti veliki opseg regulacije napona regulacionim transformatorima nego izgradnjom generatora s mogućnošću takve regulacije napona.

S obzirom na hlađenje transformatora razlikujemo: hlađenje prirodnim strujanjem zraka pored stijenki kotla transformatora ili prigrađenih hladionika, hlađenje prisilnom ventilacijom, prisilnom cirkulacijom ulja kroz hladionik koji se hladi, ili prirodnim strujanjem ili prisilnom ventilacijom, te konačno hlađenje u posebnom hladioniku kroz koji prisilno cirkulira ulje, a hladi se vodom.

B. Paralelan rad transformatora

U transformatorskim stanicama vrlo je čest slučaj da su dva ili više transformatora međusobno paralelno spojeni. Da bi bio moguć paralelan rad transformatora i omogućilo se puno iskorištenje njihove nazivne snage, potrebno je da za transformatore koji moraju biti spojeni paralelno budu ispunjeni slijedeći uvjeti:

a) da imaju jednake prijenosne omjere,

b) da imaju približno jednake nazivne napone,

c) da pripadaju istoj grupi spoja,

d) da imaju približno jednake napone kratkog spoja, odnosno da se naponi kratkog spoja međusobno ne razlikuju više od 10% od aritmetičke sredine napona kratkog spoja svih transformatora,

e) da omjer nazivnih snaga ne bude veći od 3 : 1.

Ako prijenosni omjeri nisu međusobno jednaki (npr. 30/10 i 30/10,5 kV), transformator s većim sekundarnim naponom protjerat će — i prije nego što je priključeno opterećenje na sekundarnu stranu — struju izjednačenja kroz oba transformatora (sl. 4.160a). Ako je razlika faznih napona ΔV, a impedancija jedne faze transformatora Z, struju izjednačenja možemo odrediti iz izraza

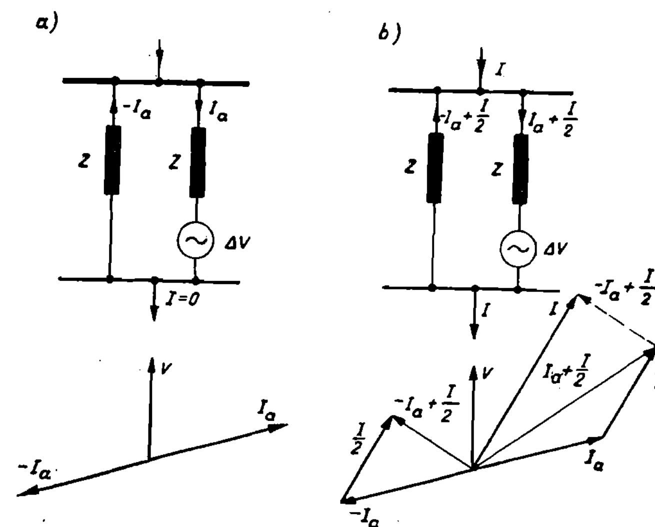
$$I_a = \frac{\Delta V}{2 Z} \qquad \ldots (4.217)$$

Postavimo još da je

$$Z = \frac{u_k V_n}{100 I_n} \qquad \ldots (4.218)$$

gdje su V_n fazni nazivni napon, u_k napon kratkog spoja u %, a I_n nazivna struja transformatora, pa će biti

$$\frac{I_a}{I_n} = \frac{\Delta V}{V_n} \frac{1}{2 u_k} 100 \qquad \ldots (4.219)$$



Slika 4.160. Struje u paralelno spojenim transformatorima s različitim prijenosnim omjerima: (a) neopterećeni i (b) opterećeni transformatori

Ako još postavimo da je

$$\frac{\Delta V}{V_n} 100 = v$$

gdje je v relativna razlika u % napona na sekundarnoj strani, dobivamo za odnos struje izjednačenja i nazivne struje transformatora

$$\frac{I_a}{I_n} = \frac{v}{2 u_k} \qquad \ldots (4.220)$$

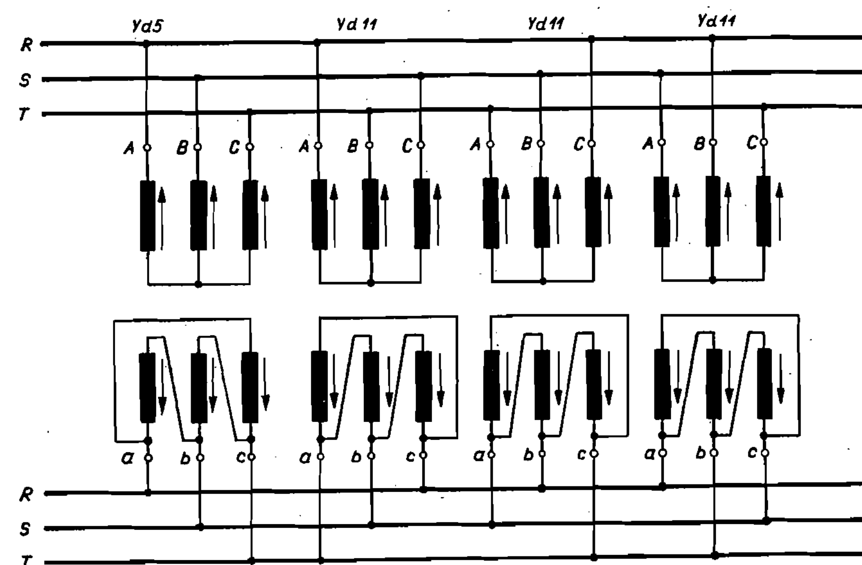
Ako je, dakle, relativna razlika napona $v = 5\%$, a napon kratkog spoja $u_k = 5\%$, struja izjednačenja iznosit će 0,5 nazivne struje. To znači da je još neopterećeni transformator već upola opterećen. Opterećivanjem na sekundarnoj strani povećavat će se opterećenje jednog, a smanjivati opterećenje drugog transformatora (sl. 4.160b), pa će brzo doći do punog opterećenja jednoga od njih. Koliko će biti moguće ukupno opterećenje, a da ne dođe do preopterećenja jednog od transformatora, ovisi i o faktoru snage opterećenja. U svakom slučaju mogućnost opterećivanja paralelno spojenih transformatora znatno je manja od zbroja njihovih nazivnih snaga, i ta mogućnost je to manja, što je veća razlika prijenosnih omjera i što je manji napon kratkog spoja. Radi toga nije dobro da se paralelno spajaju transformatori različitih prijenosnih omjera.

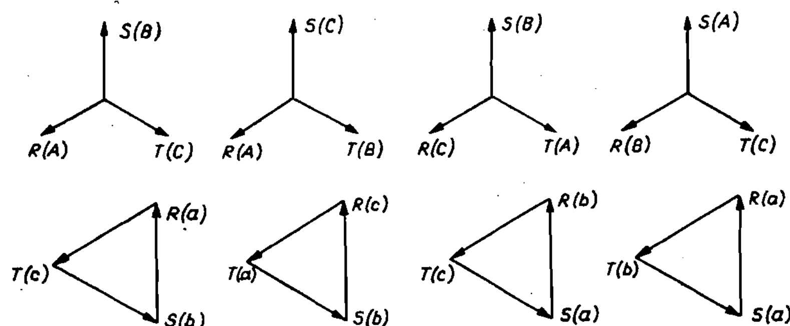
Nazivni naponi transformatora ne moraju biti međusobno potpuno jednaki. Mogu se npr. paralelno spojiti dva transformatora koji imaju prijenosne omjere 30/10 kV i 31,5/10,5 kV, jer imaju iste prijenosne omjere

ako su svi ostali uvjeti ispunjeni. Ako je napon jednak nižem nazivnom naponu pogotovo neće biti nepogodnih posljedica, no kad je napon jednak npr. višem nazivnom naponu, u transformatoru nižeg nazivnog napona teći će nešto povećana struja magnetiziranja, ali to ne može imati nepovoljne posljedice, jer je transformator građen tako da može izdržati i pogon s naponom, koji je za 5% viši od nazivnog.

Transformatori iste spojne grupe mogu se bez daljnjeg spojiti paralelno, no treba voditi računa o tome da se na istu sabirnicu spoje istoimene stezaljke, kako na primarnoj, tako i na sekundarnoj strani transformatora. Paralelno spojiti možemo npr. transformatore Dy5 i Yd5.

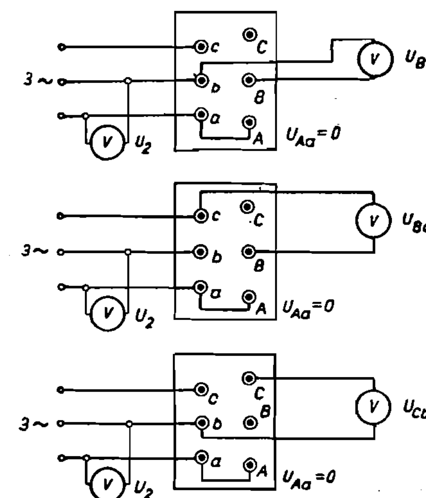
Paralelnim spajanjem transformatora različitih grupa spoja potekla bi vrlo velika struja izjednačenja. Za najmanji mogući fazni pomak (30°)





Slika 4.161. Mogućnosti paralelnog rada transformatora u spoju Yd5 s transformatorom u spoju Yd11

među naponima na sekundarnoj strani pojavila bi se npr. razlika napona od preko 50% od nazivnog, pa bi ta razlika uz $u_k = 10\%$ protjerala struju izjednačenja, koja bi (4.220) 2,5 puta bila veća od nazivne struje transformatora. Radi toga se ne mogu paralelno spojiti transformatori različitih grupa spoja. Zamjenom stezaljki, međutim, moguće je paralelno spojiti transformatore u spoju grupe 5 s transformatorima grupe 11 a da ne dođe do struja izjednačenja. Na sl. 4.161. prikazane su potrebne zamjene stezaljki na transformatoru grupe 11, da bi bio moguć paralelan rad s transformatorima grupe 5.



Slika 4.162. Potrebna mjerenja za određivanje grupe spoja transformatora metodom dvaju voltmetara

U pogonu je kojiput potrebno ustanoviti grupu spoja kojoj pripada transformator koji se želi priključiti. To naročito vrijedi za transformator na kojem se vrše prespajanja. Grupu spoja moguće je odrediti tzv. metodom dvaju voltmetara. Potrebno je međusobno kratko spojiti stezaljku *a* sa stezaljkom *A*. Priključkom sekundarnih stezaljki na trofazni napon moguće je izvršiti mjerenja triju napona i to: između stezaljki *b* i *B*, između stezaljki c i *B*, te između stezaljki *b* i *C* (sl. 4.162). Na taj način geometrijski su određeni svi vrhovi trokuta viših i nižih napona u vektorskom dijagramu, ako te trokute nacrtamo tako da im vrhovi *a* i *A* padnu zajedno. Trokuti napona za grupu spoja 5 prikazani su na sl. 4.163, dok su trokuti napona za neke druge grupe spoja nacrtani na sl. 4.164.

Promotrimo npr. slučaj kad se mjerenja napona prema sl. 4.162. vrše na transformatoru grupe spoja 5. Rezultat mjerenja prikazan je na sl. 4.163, pomoću koje možemo odrediti veličinu napona U_{Bb}, U_{Bc} i U_{Cb} u odnosu na napon U_2. Napon U_{Bb} određujemo iz pravokutnog trokuta BGb, pa je

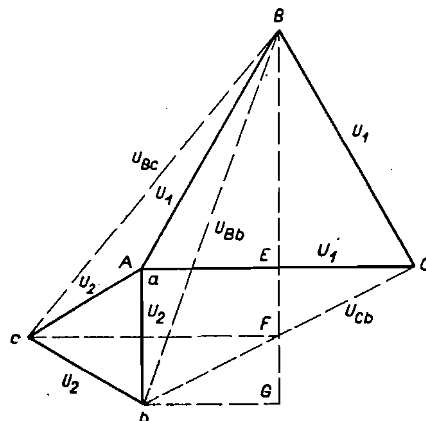
$$U^2_{Bb} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\, U_1 + U_2\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\, U_1\right)^2 \qquad \ldots (4.221)$$

Ako još uzmemo u obzir prijenosni omjer transformatora, koji možemo odrediti iz pokusa praznog hoda, pa ako postavimo

$$k = \frac{U_1}{U_2} \qquad \ldots (4.222)$$

dobit ćemo

$$U_{Bb} = U_2 \sqrt{1 + \sqrt{3}\, k + k^2} \qquad \ldots (4.223)$$



Slika 4.163. Primjer određivanja grupe spoja prema mjerenjima na sl. 4.162. (primjer vrijedi za grupu 5)

Pri određivanju napona U_{Bc} upotrijebit ćemo pravokutni trokut BFc, pa je

$$U^2_{Bc} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\, U_1 + \frac{1}{2}\, U_2\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\, U_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\, U_2\right)^2 \ldots (4.224)$$

odakle, uzimajući u obzir (4.222), dobivamo

$$U_{Bc} = U_2 \sqrt{1 + \sqrt{3}\, k + k^2} \qquad \ldots (4.225)$$

Konačno, pri određivanju napona U_{Cb} upotrijebit ćemo pravokutni trokut Cab, iz kojega slijedi

$$U^2_{Cb} = U^2_1 + U^2_2 \qquad \ldots (4.226)$$

a odatle

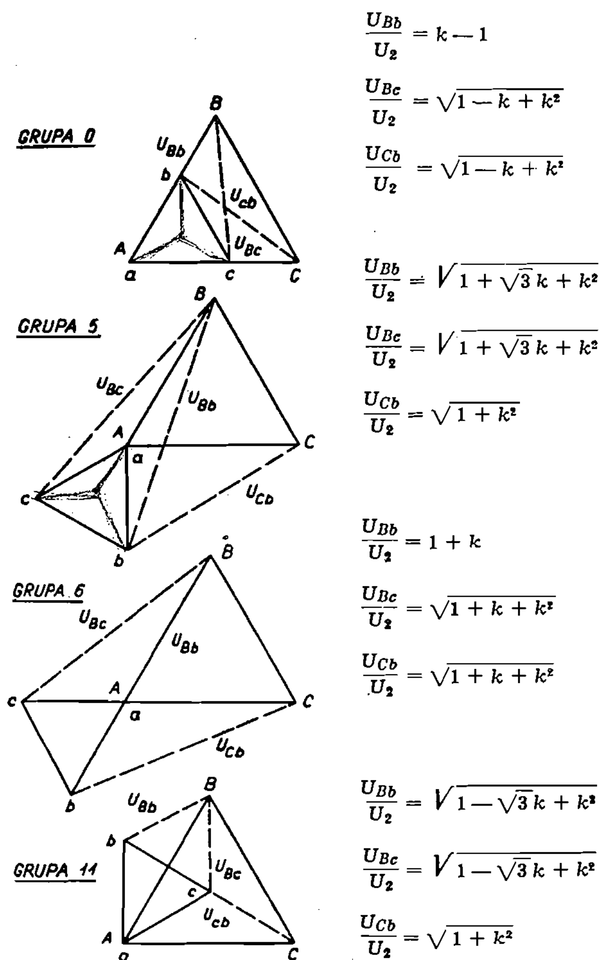
$$U_{Cb} = U_2 \sqrt{1 + k^2} \qquad \ldots (4.227)$$

Ako mjerenjem napona prema sl. 4.162. dobijemo napone koji su jednaki onima određenim relacijama (4.223), (4.225) i (4.227), znači da se radi o transformatoru grupe spoja 5.

Na analogan način mogu se izvesti izrazi i za ostale grupe spoja. Na sl. 4.164. prikazani su trokuti napona i crtkano tri napona koja se mjere metodom dvaju voltmetara, te relacije iz kojih se mogu odrediti omjeri napona U_{Bb}, U_{Bc} odnosno U_{Cb} i napona U_2.

Postupak određivanja grupe spoja jest slijedeći: odredi se prijenosni omjer iz pokusa praznog hoda, odrede se naponi prema sl. 4.162, pa se izračunaju omjeri U_{Bb}/U_2, U_{Bc}/U_2 i U_{Cb}/U_2. Uspoređivanjem rezultata mjerenja s vrijednostima omjera sa sl. 4.164. određuje se grupa spoja transformatora.

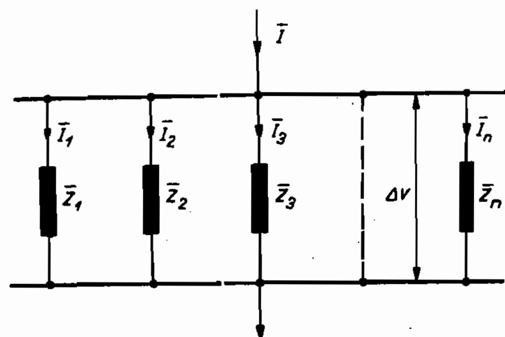
Vrijednosti omjera napona za druge grupe spoja transformatora mogu se naći npr. u (Lit. 76).



Slika 4.164. Položaj trokuta napona i omjeri mjerenih napona za određivanje grupe spoja metodom dvaju voltmetara

Male razlike napona kratkog spoja paralelno spojenih transformatora dopuštene su, jer je dopušteno i malo preopterećenje transformatora, ako ono nije trajno. Opterećenje među transformatorima s jednakim naponima kratkog spoja dijeli se naime proporcionalno nazivnim snagama transformatora, pa je u tom slučaju moguće opteretiti paralelno spojene transformatore snagom koja je jednaka sumi nazivnih snaga transformatora. Ako međutim naponi kratkog spoja nisu međusobno jednaki, ukupno opterećenje paralelno spojenih transformatora neće moći biti jednako sumi nazivnih snaga, a da transformator s najmanjim naponom kratkog spoja ne bude preopterećen.

Neka je više transformatora različitih nazivnih snaga s različitim naponima kratkog spoja spojeno paralelno. Ekvivalentna shema spoja prikazana je na sl. 4.165. Iz uvjeta da padovi napona (ΔV) moraju u svim transformatorima biti međusobno jednaki, dobivamo



Slika 4.165. Ekvivalentna shema paralelno spojenih transformatora

$$\mathbf{I}_1 \mathbf{Z}_1 = \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_2 = \mathbf{I}_3 \mathbf{Z}_3 = \dots \qquad \dots (4.228)$$

Uvrštavanjem za Z vrijednosti iz (4.218), te množenjem sa $\sqrt{3} \cdot 100/U_n$ dolazimo do relacije

$$\frac{S_1}{S_{n1}} u_{k1} = \frac{S_2}{S_{n2}} u_{k2} = \frac{S_3}{S_{n3}} u_{k2} = \dots \qquad \dots (4.229)$$

gdje su S opterećenje, S_n nazivna snaga, a u_k napon kratkog spoja transformatora. Ukupno opterećenje (S) paralelno spojenih transformatora određujemo iz izraza

$$S = \left(1 + \frac{u_{k1}}{u_{k2}} \frac{S_{n2}}{S_{n1}} + \frac{u_{k1}}{u_{k3}} \frac{S_{n3}}{S_{n1}} + \dots \right) \qquad \dots (4.230)$$

jer je npr. o[illegible]gog transformatora, uz poznato opterećenje prvoga

$$S_1 \frac{u_{k1}}{u_{k2}} \frac{S_{n2}}{S_{n1}} \qquad \dots (4.231)$$

što izlazi iz (4.229). Do izraza (4.230) dolazimo ako iz (4.229) odredimo opterećenje S_2, $S_3 \dots$ pa ih zbrojimo sa S_1. Za zadano ukupno opterećenje S opterećenje prvog transformatora određujemo iz

$$S_1 = \frac{S}{1 + \frac{u_{k1}}{u_{k2}} \frac{S_{n2}}{S_{n1}} + \frac{u_{k1}}{u_{k3}} \frac{S_{n3}}{S_{n1}} + \dots} \qquad \dots (4.232)$$

Razmotrimo slučaj kad su paralelno spojena tri transformatora nazivnih snaga $S_{n1} = 2{,}5$ MVA, $S_{n2} = 2{,}5$ MVA i $S_{n3} = 4{,}0$ MVA, s naponima kratkog spoja $u_{k1} = 6{,}0\%$, $u_{k2} = 7{,}0\%$ i $u_{k3} = 8{,}0\%$. Kad bi naponi kratkog spoja bili međusobno jednaki, maksimalno ukupno opterećenje transformatora (bez preopterećenja ijednog od njih) iznosilo bi 9,0 MVA. Postavimo pitanje: koliko se mogu opteretiti spomenuta tri paralelno spojena transformatora, uz uvjet da ni jedan od njih ne bude preopterećen? Budući da će najviše biti opterećen transformator s najmanjim naponom kratkog spoja, postavimo da je $S_1 = S_{n1}$. Tada (4.230) možemo napisati u obliku

$$S_{max} = S_{n1} + \frac{u_{k1}}{u_{k2}} S_{n2} + \frac{u_{k1}}{u_{k3}} S_{n3} + \dots \qquad \dots (4.233)$$

pa je za primjer sa tri transformatora

$$S_{max} = 2{,}5 + \frac{6{,}0}{7{,}0} 2{,}5 + \frac{6{,}0}{8{,}0} 4{,}0 =$$

$$= 2{,}50 + 2{,}14 + 3{,}00 = 7{,}64 \text{ MVA}$$

Naravno da izraz (4.233) vrijedi samo onda kad je S_{n1} snaga transformatora s najmanjim naponom kratkog spoja, što je moguće uvijek postići odgovarajućim označavanjem transformatora. Prema tome može se u promatranom slučaju paralelno spojene transformatore opteretiti tek sa 84,9% ukupne nazivne snage.

Ukoliko bismo pak htjeli povećati ukupno opterećenje iznad S_{max}, transformator s najmanjim naponom kratkog spoja preuzeo bi najveći dio povećanja opterećenja u odnosu na njegovu nazivnu snagu. Ako je ukupno opterećenje jednako sumi nazivnih opterećenja ($S = S_n$), opterećenje prvog transformatora može se odrediti iz (4.232), a opterećenja ostalih prema (4.231). Iz toga slijedi

$$S_1 = \frac{9{,}0}{1 + \frac{6{,}0}{7{,}0} \cdot \frac{2{,}5}{2{,}5} + \frac{6{,}0}{8{,}0} \cdot \frac{4{,}0}{2{,}5}} = 2{,}95 \text{ MVA} = 1{,}18\, S_{n1}$$

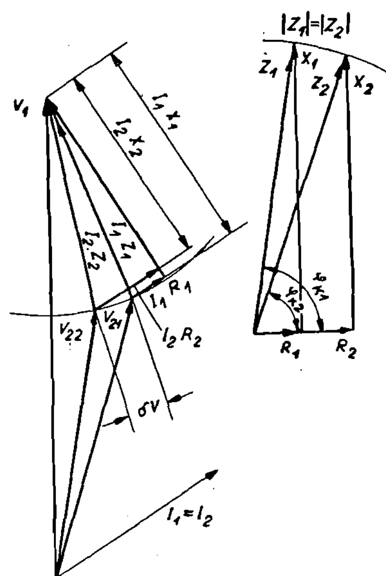
$$S_2 = 2{,}95 \frac{6{,}0}{7{,}0} \cdot \frac{2{,}5}{2{,}5} = 2{,}52 \text{ MVA} = 1{,}01\, S_{n2}$$

$$S_3 = 2{,}95 \frac{6{,}0}{8{,}0} \cdot \frac{4{,}0}{2{,}5} = 3{,}53 \text{ MVA} = 0{,}88\, S_{n3}$$

Prvi će transformator biti, dakle, preopterećen za 18%, dok će treći — s najvećim naponom kratkog spoja — biti opterećen tek sa 88% nazivne snage.

Iz izloženog se može zaključiti da paralelno spajanje transformatora različitih napona kratkog spoja nije nemoguće i da se može provesti samo u slučaju nužde, jedino onda, ako je ukupno opterećenje manje od zbroja nazivnih snaga transformatora. Za koliko se ukupno opterećenje mora razlikovati od zbroja nazivnih snaga ovisi o razlici naponâ kratkog spoja. Paralelno spajanje takvih transformatora kao trajno rješenje nije međutim ekonomski opravdano radi nemogućnosti iskorištenja pune snage transformatora.

Jednakost padova napona — prema (4.228) — i po iznosu i po fazi bit će postignuta samo onda kad je omjer između djelatnog otpora R i reaktancije X, koji čine impedanciju Z, konstantan za sve paralelno spojene transformatore. Taj uvjet je normalno ispunjen u transformatorima približno jednakih nazivnih snaga. Ako je, međutim, odnos nazivnih snaga veći od 3 : 1, postojat će tolika razlika između omjera R/X u transformatorima da će izazvati struje izjednačenja radi razlike padova napona i pored toga što su naponi kratkog spoja međusobno jednaki. Da to ilustriramo, prikažimo (sl. 4.166) padove napona u dva transformatora iste snage, istih napona kratkog spoja, ali različitih omjera R/X, odnosno različitih kutova među djelatnim otporima i impedancijama, a uz pretpostavku da kroz oba transformatora teku jednake struje, što bi bilo poželjno s obzirom na mogućnost iskorištenja transformatora. Na sekundarnim stezaljkama takvih i tako opterećenih transformatora vladat će različiti naponi (V_{21} i V_{22} na sl. 4.166), pa će u paralelnom spoju razlika napona (δV) protjerati struju izjednačenja kroz transformatore.



Slika 4.166. Naponi na sekundarnim stezaljkama transformatora jednakih nazivnih snaga, jednakih napona kratkog spoja, opterećenih jednakim strujama, ali s različitim omjerima R/X odnosno različitim kutevima među impedancijom i djelatnim otporima

C. Kontrola u pogonu

Mogućnost opterećenja transformatora ovisna je o ugrijavanju. Granica ugrijavanja određena je propisima određenim graničnom temperaturom, a ovisna je o upotrebljenoj izolaciji.

Prema propisu JUS dopušteno je granično povišenje srednje temperature u namotu za 60 °C (odnosno za 65 °C ukoliko se radi o transformatoru s prisilnom cirkulacijom ulja), dok je granično dopušteno povišenje temperature ulja (mjereno što je moguće bliže gornjoj razini) za 55 °C, ako je ulje u glavnom kotlu zaštićeno od dodira sa zrakom, odnosno za 50° C, ako ta zaštita ne postoji. Navedena granična povišenja temperature vrijede uz slijedeće pretpostavke s obzirom na temperaturu okolnog zraka: najviša temperatura 40 °C, prosječna dnevna temperatura do 30 °C, a prosječna godišnja temperatura do 20 °C. Ako se radi o hlađenju vodom, navedena granična povišenja temperature vrijede uz pretpostavku da voda na ulazu u hladionik nema višu temperaturu od 25 °C.

Dopušteno trajanje preopterećenja ovisno je o opterećenjima u prethodnom vremenskom razdoblju i o vremenskoj konstanti transformatora.. Uzimajući u obzir vremensku konstantu, dopušteno trajanje preopterećenja može se odrediti postupkom opisanim u (Lit. 74). Kao orijentacione vrijednosti navodimo dopuštena trajanja preopterećenja u ovisnosti o veličini preopterećenja i prethodnom opterećenju (za uljne transformatore građene prema standardu JUS odnosno prema preporukama IEC)

preopterećenje u % od nazivne snage	prethodno opterećenje u % od nazivne snage 50%	75%	90%
10%	180 min.	120 min.	60 min.
20%	90 min.	60 min.	30 min.
30%	60 min.	30 min.	15 min.
40%	30 min.	15 min.	8 min.
50%	15 min.	8 min.	4 min.

Budući da ulje u transformatorima, osim za odvođenje topline, služi i kao izolacija, kontrola električne probojne čvrstoće ulja jedna je od važnih pogonskih kontrola. Električna probojna čvrstoća ispituje se u aparatu s tačno definiranim elektrodama, između kojih je razmak 2,5 mm. Prema JUS-u se smatra da ulje u transformatoru ima dovoljnu električnu čvrstoću, ako probojna čvrstoća iznosi za transformatore

nazivnog napona do 35 kV	barem 80 kV/cm
nazivnog napona iznad 35 do 110 kV	barem 120 kV/cm
nazivnog napona iznad 110 do 220 kV	barem 140 kV/cm

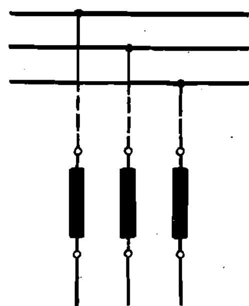
Ukoliko kontrola probojne čvrstoće pokaže da ulje ne odgovara navedenim zahtjevima, potrebno ga je pročistiti, da bi se u prvom redu odstranila voda koja se sakupila u njemu. Pročišćavanje ulja vrši se posebnim centrifugama, sve dok se ne postigne dovoljna električna probojna čvrstoća (poželjna vrijednost 200 kV/cm). Novo transformatorsko ulje pripremljeno za punjenje treba da ima probojnu čvrstoću od barem 200 kV/cm.

Kontrola ugrijavanja transformatora obavlja se termometrom (živin ili otporni) za mjerenje temperature ulja, koji se smještava u »džep« u poklopcu transformatora, kako bi se izmjerila najviša temperatura ulja. Osim toga, za kontrolu visine ulja postoji uljokazno staklo.

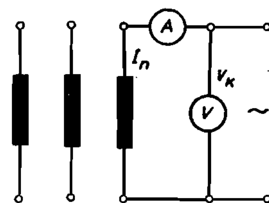
4.6. PRIGUŠNICE

Zadatak je prigušnica koje se ovdje razmatraju da smanje struje kratkog spoja. Iste prigušnice mogu se upotrijebiti, no što je vrlo rijedak slučaj, da omoguće paralelan rad transformatora sa znatno različitim naponima kratkog spoja.

Prigušnica je izvedena kao svitak bez željeza, a spaja se u seriju s potrošačima i izvorima (sl. 4.167). Trofazna prigušnica sastoji se od tri međusobno električki odijeljene prigušnice.



Slika 4.167. Priključak prigušnice u odvodu



Slika 4.168. Određivanje napona kratkog spoja prigušnice

Prigušnica je karakterizirana nazivnim naponom, prolaznom snagom i naponom kratkog spoja. Nazivni napon prigušnice određen je nazivnim naponom mreže, prema kojemu je dimenzionirana izolacija prigušnice. Prolazna nazivna snaga prigušnice jest snaga koja može trajno prolaziti kroz prigušnicu, a da se namot ne ugrije iznad dopuštene temperature. Prolazna nazivna snaga (S_n) odnosi se na trofaznu prigušnicu (slog od tri prigušnice), pa je nazivna struja određena izrazom

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}\, U_n} \qquad \ldots (4.234)$$

gdje je U_n nazivni linijski napon. Napon kratkog spoja definiran je na analogan način kao i napon kratkog spoja transformatora. Narinemo li, naime, na stezaljke prigušnice jedne faze (sl. 4.168) toliki napon da kroz prigušnicu poteče nazivna struja, napon na stezaljkama bit će jednak

naponu kratkog spoja (V_k). Napon kratkog spoja u postocima odredit ćemo izrazom

$$u_k = \frac{\sqrt{3}\, V_k}{U_n}\, 100\% \qquad \ldots (4.235)$$

Faktor $\sqrt{3}$ dolazi radi toga jer su U_n linijski, a V_k fazni napon.

Razlika apsolutnih vrijednosti napona prije i nakon prigušnice (gubitak napona) može se dovoljno tačno odrediti iz relacije

$$\Delta V = I\, X \sin \varphi \qquad \ldots (4.236)$$

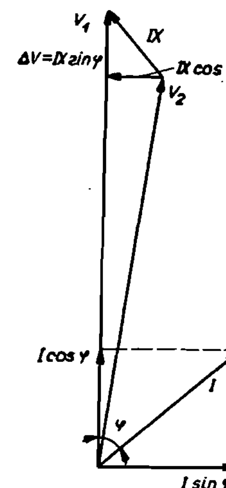
pri čemu je zanemaren djelatni otpor i uzeto u obzir da je fazni pomak među naponima V_1 i V_2 malen (sl. 4.169). Ako znamo da je $X = V_k/I_n$, te da je relativni pad napona u procentima

$$u = \sqrt{3}\, \frac{\Delta V}{U_n}\, 100 \qquad \ldots (4.237)$$

a nakon uvrštavanja u (4.236), dobivamo

$$u\,\% = u_k \frac{I}{I_n} \sin \varphi \qquad \ldots (4.238)$$

Prema tome u normalnom pogonu, kad je faktor opterećenja ($\cos \varphi$) obično visok, prigušnica izaziva malu razliku napona.



Slika 4.169. Određivanje razlike napona u prigušnici (djelatni otpor zanemaren)

Prigušnice se upotrebljavaju za napone do 35 kV, a izvode se za napone kratkog spoja 5, 6 i 10%.

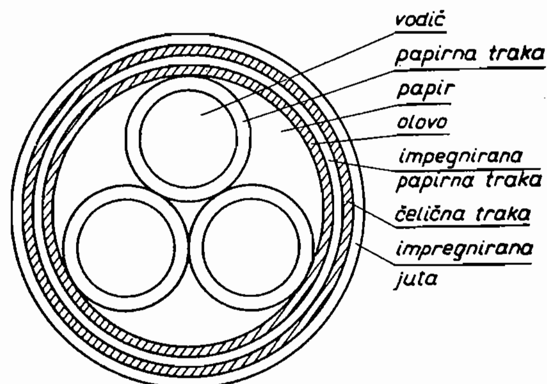
Prilikom izbora potrebno je odabranu prigušnicu kontrolirati s obzirom na udarnu struju i struju mjerodavnu za ugrijavanje. Prema njemačkim propisima termička granična struja iznosi $20\, I_n$, a dinamička granična struja $50\, I_n$.

4.7. KABELI

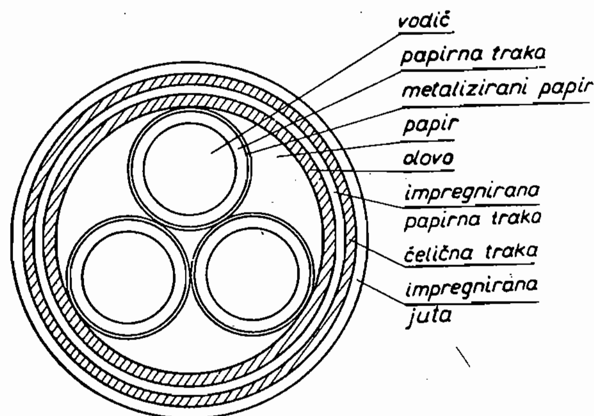
A. Upotreba i izvedba

Često se u rasklopnim postrojenjima i elektranama upotrebljavaju kabeli kao spoj između dijelova postrojenja, između dalekovoda i njegova odvoda, između generatora i transformatora i dr.

Kabeli se razlikuju prema izvedbi, koja je prilagođena naponima, zaštiti od vanjskih utjecaja, naprezanju i sl.

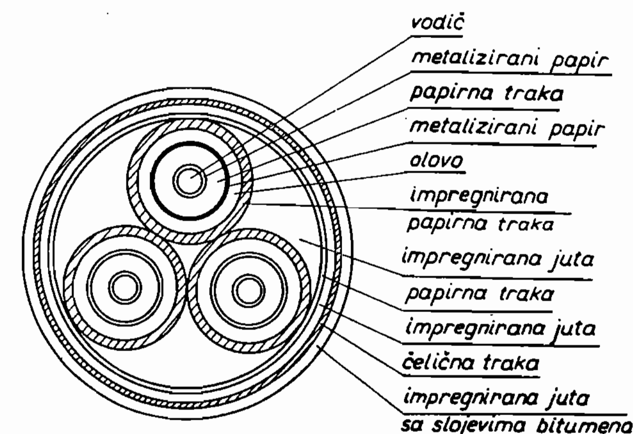


Slika 4.170. Presjek normalnog kabela



Slika 4.171. Presjek kabela s metaliziranim žilama (H-kabel)

Za napone do 60 kV upotrebljavaju se kabeli s papirnom izolacijom, među kojima razlikujemo: normalne kabele (sl. 4.170), kabele s metaliziranim žilama (H-kabeli) (sl. 4.171) i kabele s pojedinačnim olovnim plaštevima (sl. 4.172). Svaka izvedba kabela ima prema standardu posebne oznake. Navodimo oznake (prema jugoslavenskom, a u zagradama prema njemačkom standardu), za neke normalne kabele s vodičima od bakra:



Slika 4.172. Presjek kabela s pojedinačnim olovnim plaštevima

a) nearmirani kabeli

IPO 00	(NK)	— kabel s nezaštićenim olovnim plaštem (goli kabel),
IPO 01	(NKA)	— kabel s olovnim plaštem i zaštitnim ovojem (asfaltirani kabel)
IPO 04	(NKY)	— kabel s olovnim plaštem i zaštitnim plaštem od pvc-mase

b) armirani kabeli bez vanjskog zaštitnog ovoja

IPO 10	(NKB)	— kabel s olovnim plaštem, zaštitnim ovojem, armiran dvostrukom čeličnom trakom
IPO 20	(NKR)	— kao IPO 10 (NKB), ali armiran okruglom čeličnom žicom
IPO 30	(NKF)	— kao IPO 10 (NKB), ali armiran plosnatom čeličnom žicom
IPO 32	(NKFG)	— kabel s olovnim plaštem, zaštitnim ovojem, armiran plosnatom čeličnom žicom i nasuprot motanom spiralom od plosnate čelične žice

c) armirani kabeli

IPO 13	(NKBA)	— kabel s olovnim plaštem, zaštitnim ovojem, armiran čeličnom trakom i vanjskim zaštitnim ovojem impregniranim kompaund-masom protiv korozije
IPO 23	(NKRA)	— kao IPO 13 (NKBA), ali armiran okruglom čeličnom žicom
IPO 33	(NKFA)	— kao IPO 13 (NKBA), ali armiran plosnatom čeličnom žicom

Oznake za kabele s aluminijskim vodičem iste su kao one kabela s vodičima od bakra, samo što se prema jugoslavenskom standardu prije oznake presjeka stavlja slovo A (npr. IPO 13-A 3×120 mm²), a prema njemačkom umeće se između N i K slovo A (npr. NAK ili NAKBA).

Kabeli s metaliziranim žilama imaju metalnu foliju iznad izolacije svakog vodiča. Prema njemačkom standardu označuju se kao normalni kabeli, ali se između slova N i K umeće slovo H (Höchstädterovi kabeli). Jugoslavenski standard ne razlikuje kabel s metalnom folijom od onog bez te folije. Na primjer

IPO 13 (NHKBA) — kabel s vodičima od bakra, s metaliziranim žilama, olovnim plaštem, zaštitnim ovojem, armiran čeličnom trakom i vanjskim ovojem
IPO 13-A (NAHKBA) — kao IPO 13 (NHKBA), samo s vodičima od aluminija

Kabeli s pojedinačnim olovnim plaštevima imaju taj plašt iznad izolacije svake žile, koje su spletene, a oko spletenih žila namotani su čelični oklop i zaštitni ovoj. Označuju se kao normalni kabeli, samo što se, prema našem standardu, između P i O umeće slovo Z, a prema njemačkom standardu između slova N i K slovo E. Na primjer

IPZO 13 (NEKBA) — kabel s vodičima od bakra, s pojedinačnim olovnim plaštevima, unutarnjim zaštitnim ovojem, oklopom od čelične trake i vanjskim zaštitnim ovojem.
IPZO 13-A (NAEKBA)— kao IPZO 13 (NEKBA), samo s vodičima od aluminija.

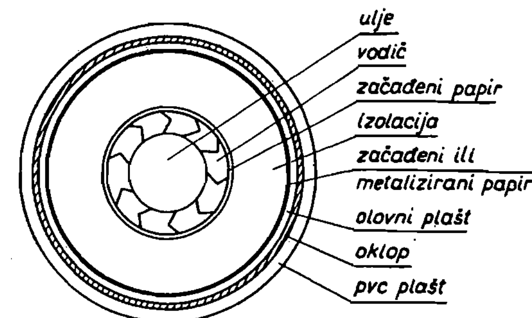
Kabeli s pojedinačnim olovnim plaštevima izvode se i s metalnim folijama ispod olovnih plašteva. S obzirom na oznake vrijedi spomenuto za kabele s metalnom folijom bez olovnih plašteva. Takvi kabeli označuju se, na primjer

IPZO 13 (NHEKBA) — kao NEKBA, samo s metalnim folijama,
IPZO 13-A (NAHEKBA) — kao NHEKBA, samo s vodičima od aluminija.

Normalni kabeli upotrebljavaju se za napone do 15 kV, oni s metaliziranim žilama za napone 15 i 20 kV, dok se kabeli s pojedinačnim olovnim plaštevima normalno upotrebljavaju za napone iznad 15 kV, a izvode se za napone od 3 do 60 kV. Kabeli sa pojedinačnim olovnim plaštevima za 30 kV i više izvode se s metalnim folijama.

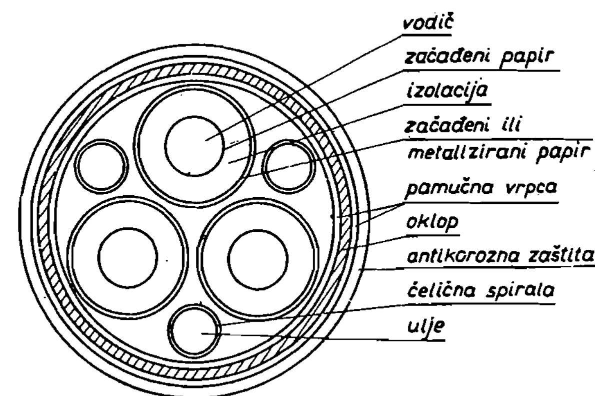
Pri polaganju u zgradama, gdje je kabel zaštićen od mehaničkog oštećenja i djelovanja vlage na olovni plašt, upotrebljava se goli kabel (oznake prema jugoslavenskom standardu IPO 00, IPO 00-A, IPZO 00, IPZO 00-A, a prema njemačkom standardu NK, NAK, NHK, NAHK, NEK, NAEK, NHEK ili NAHEK). Ako postoji opasnost od titranja, ne preporučuje se upotreba golog kabela. Za polaganje u zgradama dolaze u obzir slijedeće izvedbe kabela: IPO 01 (NKA) ili analogan kabel prema visini napona — kad je kabel izvrgnut djelovanju vlage; IPO 10 (NKB) ako postoji opasnost od titranja; IPO 30 (NKF) — kad je kabel opterećen na vlak; i IPO 20 (NKR) — kad je kabel jako opterećen na vlak.

Za polaganje u zemlju upotrebljavaju se slijedeće izvedbe kabela: IPO 13 (NKBA) — kad se ne postavljaju posebni zahtjevi s obzirom na mehanička naprezanja; IPO 33 (NKFA) — u slučaju opterećenja na vlak (npr. strma kosina) i IPO 23 (NKRA) — u slučaju jakog opterećenja na vlak (npr. vrlo strma kosina).



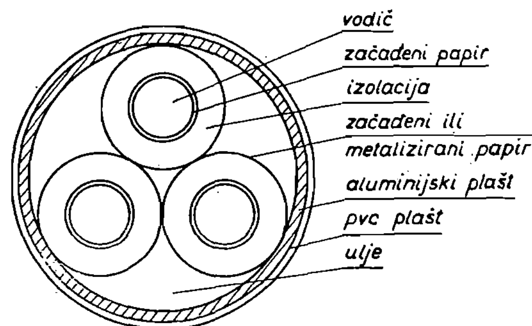
Slika 4.173. Uljem punjeni niskotlačni kabel

Izvedbe upotrebljene za napone do 60 kV ne mogu se primijeniti za vrlo visoke napone zbog nesavršenosti izolacije (u izolaciji se nalaze ostaci zraka ili plinova) i zbog nejednolikog rastezanja sastavnih dijelova kabela (kabelska masa ima veći koeficijent rastezanja od ostalih dijelova), što pri hlađenju dovodi do stvaranja šupljina. To dovodi do ionizacije, rastvaranja izolacije i konačno do proboja kabela. Da se premoste spomenute poteškoće potrebno je: a) onemogućiti nastajanje šupljina unutar izolacije i b) podići prag početka ionizacije iznad najveće jakosti polja. Prvu poteškoću može se otkloniti upotrebom rijetkog ulja za impregnaciju papirne izolacije, dok za svladavanje druge poteškoće postoje dva načina: primjena vanjskog tlaka na normalan kabel, pri čemu je ulje ili



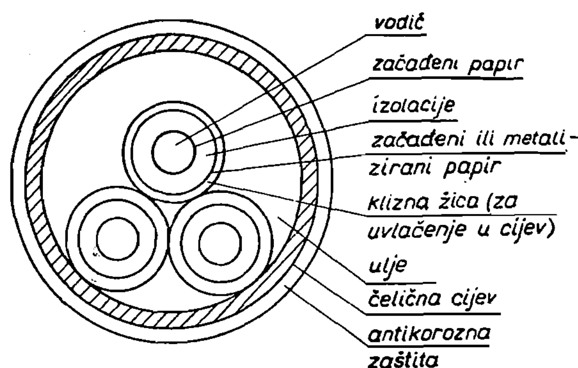
Slika 4.174. Uljem punjeni niskotlačni trofazni kabel

plin odijeljeno dijafragmom od izolacije kabela (povišenim tlakom dušika od 1 na 15 ata podiže se prag ionizacije od 5,7 kV/mm na 19 kV/mm), te uvođenje plina ili ulja pod visokim tlakom u izravan dodir s izolacijom.



Slika 4.175. Uljem punjeni niskotlačni trofazni kabel s aluminijskim plaštem

Razlikujemo uljne i plinske kabele. Tehnika kabela najviših napona u punom je razvoju, pa danas postoji niz različitih izvedaba. Uljni kabeli se izvode kao jednožilni (sl. 4.173) i kao trožilni (sl. 4.174, 4.175. i 4.176). Ulje u kabelima prikazanim na sl. 4.173. do 4.175. nalazi se pod tlakom od oko 1 do 1,5 atp, dok je u kabelu na sl. 4.176. pod tlakom od 15 atp. Plinski trožilni kabeli često se izvode na isti način kao i uljni prikazan na sl. 4.176.



Slika 4.176. Uljni niskotlačni trofazni kabel u čeličnoj cijevi

Kako bi se osiguralo da širenje ulja zbog ugrijavanja ne rasteže plašt kabela, a pri hlađenju da ne dođe do praznina u njemu, postavljaju se tlačne posude na jednom ili na oba kraja kabela, a po potrebi i uzduž

njegove trase. U tlačnim posudama za niskotlačne kabele postoji niz metalnih jastuka u kojima se nalazi plin pod tlakom. Metalni jastuci stlačuju se kad u posudu ulazi ulje iz kabela, a tlače ulje i vraćaju ga u kabel kad se ulje ohladi. Za visokotlačne kabele elastični jastuci su napunjeni uljem, a prostor između njih i stijenka posude ispunjen je plinom pod tlakom. Tlak ulja u visokotlačnom kabelu i posudama održava se pomoću uljnih pumpi na kraju kabela, gdje zbog sigurnosti moraju postojati i rezervne pumpe. Da se dopuni plin u plinskom kabelu na jednom kraju (kod dugih na oba kraja) postavljaju se rezervne boce s plinom.

B. Izbor presjeka

Izbor presjeka kabela vrši se prema maksimalnoj struji u normalnom pogonu i prema ugrijavanju za vrijeme trajanja kratkog spoja.

Normalno se određuje najprije potreban presjek kabela prema maksimalnoj struji u normalnom pogonu, a tada se polazi od opterećenosti kabela ukopanog u zemlju (na dubini od 70 cm), uz pretpostavku da u neposrednoj blizini nema drugih kabela. U tab. 4.19. i 4.20. navedeni su podaci o opteretivosti bakrenih, odnosno aluminijskih trožilnih kabela, uz navedene pretpostavke (jedan u zemlju ukopani kabel). Pri tome je računato da je temperatura tla 20 °C, da temperatura vodiča kabela ne prelazi 65 °C za kabele do 6 kV, 55 °C za kabele 10 do 20 kV, te 45 °C za kabele 30 do 60 kV.

Ako su kabeli položeni u zemlju jedan pored drugoga sa razmakom od 7 cm, najveća trajno dopuštena struja manja je od one navedene u tab. 4.19. i 4.20. Korekcioni faktor za određivanje opteretivosti kabela ako je nekoliko njih položeno u zemlju jedan kraj drugoga sa razmacima od oko 7 cm, iznosi (uz temperaturu tla od 20 °C)

TABLICA 4.19.

Opteretivost bakrenih trožilnih kabela
(jedan kabel položen u zemlji)

Presjek mm^2	Kabel IPO 13 (NKBA)			Kabel IPZO 13 (NHEKBA)			
	3 kV	6 kV	10 kV	20 kV	30 kV	45 kV	60 kV
10	80	75	65	—	—	—	—
16	105	100	85	—	—	—	—
25	135	130	110	115	—	—	—
35	165	160	135	140	135	—	—
50	200	195	165	170	165	155	—
70	145	235	200	210	200	185	—
95	290	280	240	245	235	220	210
120	335	325	280	285	270	250	240
150	380	370	320	325	310	325	270
185	435	420	360	365	345	320	305
240	505	490	420	425	400	370	355
300	570	560	475	480	450	420	400
400	660	—	—	550	515	485	460

TABLICA 4.20.

Opteretivost aluminijskih trožilnih kabela
(jedan kabel položen u zemlji)

Presjek mm²	Kabel IPO 13 (NAKBA)			Kabel IPZO 13 (NAHEKBA)			
	3 kV	6 kV	10 kV	20 kV	30 kV	45 kV	60 kV
10	65	60	50	—	—	—	—
16	85	80	70	—	—	—	—
25	110	105	90	90	—	—	—
35	130	125	110	110	105	—	—
50	160	155	130	135	130	125	—
70	195	190	160	170	160	160	—
95	230	225	190	195	185	175	170
120	270	260	225	230	215	200	190
150	305	295	255	260	250	230	215
185	350	335	290	290	275	255	245
240	405	390	340	340	320	295	280
300	460	445	385	385	360	335	320
400	530	—	—	440	415	390	370

broj kabela	korekcioni faktor
1	1,00
2	0,90
3	0,80
4	0,75
5	0,70
6	0,65
8	0,62
10	0,60

Ako se pri polaganju kabela u zemlju upotrijebi zaštitni pokrov iznad kabela, pa radi toga između kabela i pokrova mogu nastati praznine, treba im opteretivost smanjiti za 10 do 20%.

Ako kabel nije položen u zemlju, odvođenje topline je slabije, pa je potrebno korigirati najveću trajno dopuštenu struju. U slučaju da se računa s temperaturom zraka od 20 °C, korekcioni faktor iznosi

za jedan kabel	0,80
za tri kabela, ako je razmak među njima jednak promjeru kabela	0,74
za tri kabela, ako se dodiruju	0,65
za šest kabela, ako je razmak među njima jednak promjeru kabela	0,70
za šest kabela, ako se dodiruju	0,60

Navedeni podaci o korekcionim faktorima vrijede, kako je spomenuto, za temperaturu tla ili zraka od 20 °C, pa je potrebno uvesti daljnju korekturu ako se temperature razlikuju od 20 °C. Spomenuti korekcioni faktori iznose

temperatura tla ili zraka	nazivni napon kabela 1—6 kV	10—20 kV	30—60 kV
5 °C	1,15	1,20	1,26
10 °C	1,10	1,13	1,18
15 °C	1,05	1,07	1,10
20 °C	1,00	1,00	1,00
25 °C	0,94	0,93	0,90
30 °C	0,88	0,85	0,78
35 °C	0,82	0,76	0,63

Ako npr. treba odrediti opteretivost trožilnog aluminijskog kabela 10 kV prosjeka 70 mm², koji je položen u zemlju u istom kanalu sa još dva kabela, te ako je temperatura tla 30 °C, poslužit ćemo se tab. 4.20. iz koje se očitava 160 A kao dopuštenu opteretivost kabela. Uzimajući u obzir korekcione faktore 0,80 (tri kabela položena u zemlju) i 0,85 (temperatura tla 30 °C), dobivamo da je najveće trajno dopušteno opterećenje

$$0,80 \cdot 0,85 \cdot 160 = 109 \text{ A}$$

Pri određivanju potrebnog presjeka s obzirom na ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkog spoja vrijede iste pretpostavke kao kad se radi o golim vodičima (poglavlje 4.1C). Za kabele, međutim, račun treba provesti uz slijedeće dopušteno povišenje iznad najviše dopuštene temperature u normalnom pogonu

za kabele do 3 kV (Cu ili Al)	$\Delta\vartheta = 150\,°C$
za kabele iznad 3 do 20 kV (Cu ili Al)	$\Delta\vartheta = 120\,°C$
za kabele iznad 20 kV (Cu ili Al)	$\Delta\vartheta = 100\,°C$

Potreban presjek određuje se — prema izrazu (4.9) iz relacije

$$q = a\, I_t \sqrt{t}\ \text{mm}^2 \qquad \ldots (4.239)$$

gdje su a veličina ovisna o materijalu i o dopuštenom povišenju temperature, I_t struja kratkog spoja mjerodavna za ugrijavanje u kA, dok je t trajanje kratkog spoja u sekundama. Veličina a iznosi

za kabele s bakrenim vodičima

do 3 kV	$a = 7,1$
iznad 3 do 20 kV	$a = 7,9$
iznad 20 kV	$a = 8,7$

za kabele s aluminijskim vodičima

do 3 kV	$a = 11,1$
iznad 3 kV do 20 kV	$a = 12,4$
iznad 20 kV	$a = 13,6$

Ako je potrebni presjek kabela, određen prema ugrijavanju za vrijeme trajanja kratkog spoja, veći od presjeka izabranog prema maksimalnoj struji u normalnom pogonu, mjerodavan je veći presjek. Presjek

kabela određen s obzirom na struju kratkog spoja za neko rasklopno postrojenje najmanji je presjek kabela koji se smije upotrijebiti u dotičnom rasklopnom postrojenju.

4.8. ODVODNICI PRENAPONA

A. Svrha

U mreži se pojavljuju prenaponi radi prelaznih pojava pri promjeni stanja u mreži (kratki spojevi, isklapanja i dr.), te radi atmosferskih pražnjenja. Rasklopna postrojenja i aparati u njima građeni su tako da mogu izdržati određena naponska naprezanja, ali je nemoguće spriječiti da se u mreži pojave prenaponi veći od onih koje mogu izdržati izolatori, aparati i transformatori u rasklopnom postrojenju, što naročito vrijedi za prenapone zbog atmosferskih pražnjenja.

Da bi se spriječilo štetno djelovanje tih prenapona, potrebno je spriječiti prodor opasnih prenapona do rasklopnog postrojenja, odnosno spriječiti prodor do dijelova postrojenja u kojima previsoki prenaponi mogu izazvati najveće štete. Potrebno je te prenapone prije ulaska u rasklopno postrojenje smanjiti toliko da ne izazovu oštećenja ili ako ih već izazovu, da do njih dođe na dijelovima postrojenja manje vrijednosti i onih koji se lakše mogu zamijeniti.

Da se sve to postigne, potrebno je provesti koordinaciju izolacije u rasklopnom postrojenju, koja se sastoji u izoliranju pojedinih dijelova opreme za različite izolacione nivoe. Prema njemačkim propisima razlikujemo tri nivoa:

a) gornji izolacioni nivo odnosi se na izolaciju od krutog, tekućeg ili stlačenog materijala (npr. unutarnja izolacija transformatora, kabela i kondenzatora), kao i na sve zatvorene ili teško pristupačne preskočne staze u zraku, zatim na prekidna mjesta rastavljača, učinskih rastavljača, sklopaka, nosača osigurača i sl., nadalje na međusobnu izolaciju odvojenih mreža;

b) donji izolacioni nivo odnosi se na izolaciju između vodiča i zemlje, a taj se nivo odnosi na potporne i provodne izolatore, na izolatore za nadzemne vodove, zatim na sklopke, rastavljače, pa u nekim slučajevima i na naponske i strujne transformatore,

c) zaštitni izolacioni nivo je najniži od triju izolacionih nivoa, a ostvaruje se upotrebom odvodnika prenapona koji ima zadatak da prenapon iz mreže snizi na napon koji odgovara zaštitnom izolacionom nivou.

Prema našim standardima o koordinaciji izolacije postoji jedan izolacioni nivo, te zaštitni nivo. Izolacioni nivo definiran je podnosivim udarnim naponom za val oblika 1,2/50 µs, dok je visina jednaka gornjem izolacionom nivou po njemačkim propisima.

U tab. 1.4. navedeni su podaci o izolacionim nivoima (podnosivim naponima) prema njemačkim propisima. Gornji nivo odgovara podnosivom udarnom naponu za val 1/50 µs, a donji podnosivom udarnom naponu za odrezani val.

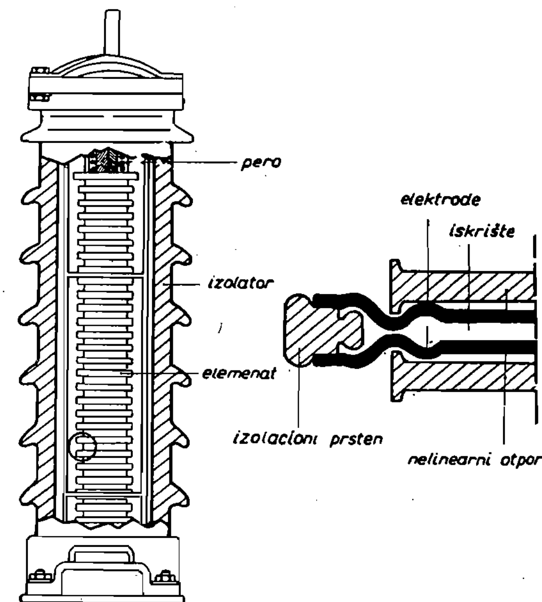
Da bi se postigao zaštitni izolacioni nivo upotrebljavaju se ventilni odvodnici, cijevni odvodnici i zaštitna iskrišta.

B. Ventilni odvodnici

Ventilni odvodnik sastoji se od iskrišta spojenog u seriju s nelinearnim otpornikom (sl. 4.177), a priključuje se između vodiča i zemlje. Kad napon vodiča prema zemlji postigne toliku visinu da dođe do preskoka iskrišta (proradni napon odvodnika), kroz nelinearne otpore proteći će struja čija se ovisnost o naponu može prikazati relacijom

$$i = k\,u^n \qquad \dots (4.240)$$

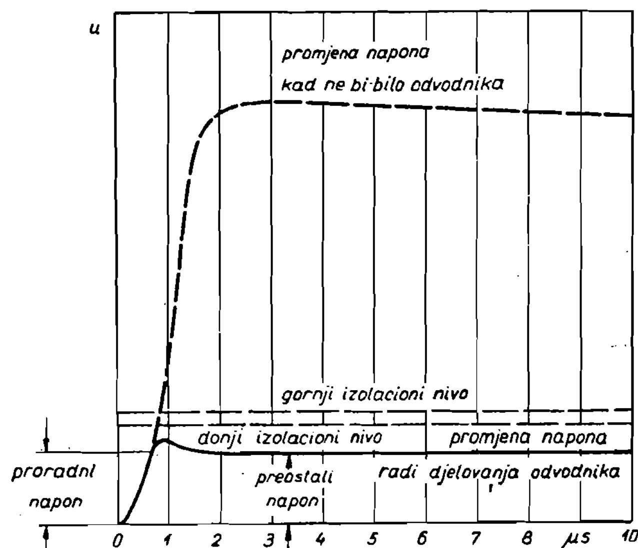
gdje su: i struja kroz odvodnik, u napon koji djeluje na odvodnik, k konstanta, a n eksponent ovisan o svojstvima otpora. Iskrište se sastoji od pojedinih iskrišta s razmacima od 0,1 do 1,5 mm. Nelinearan otpornik sastoji se od pločica sitnozrnatog silicijevog karbida, a ima otpornu karakteristiku koja odgovara relaciji (4.240).



Slika 4.177. Presjek kroz ventilni odvodnik

Porastom napona između vodiča i zemlje radi prenaponskog vala, što je posljedica atmosferskog pražnjenja, pojavit će se luk među iskrištima odvodnika, kad napon postigne visinu proradnog napona odvodnika koji ovisi o broju i razmacima iskrišta (sl. 4.178). Radi nelinearnosti otpora naboj odlazi u zemlju preko relativno malog otpora (radi velikog napona), zbog čega će napon ostati praktički na visini proradnog napona odvodnika. Na taj način mjesto daljnjeg povišenja napona, do čega bi došlo kad ne bi bilo odvodnika prenapona, napon (preostali) ostaje na visini zaštitnog izolacionog nivoa. Nestankom prenapona na vodu porast će otpor, što će dovesti do znatnog smanjenja struje i do gašenja luka u

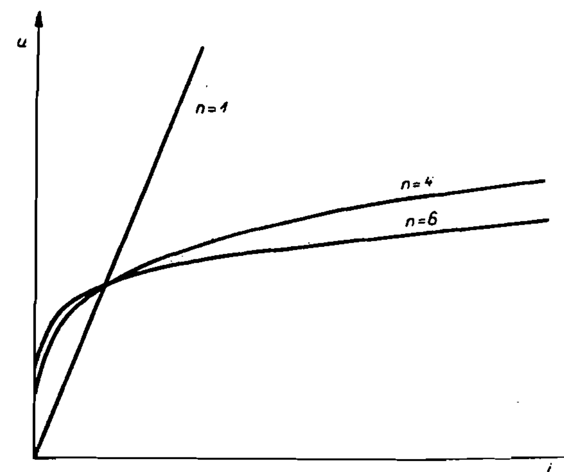
iskrištu, pa kroz odvodnik i pored djelovanja pogonskog napona neće protjecati struja. Ventilni odvodnik ima to manji preostali napon i to sigurnije prekida struju nakon nestanka prenapona što je veći eksponent n u relaciji (4.240). To je vidljivo iz dijagrama na sl. 4.179, u kojem je prikazana ovisnost napona o struji za linearni otpor ($n = 1$) i za nelinearne otpornike ($n = 4$ i $n = 6$). Ventilni otpornici izrađuju se danas za najmanje $n = 6$.



Slika 4.178. Promjena napona radi djelovanja odvodnika

Nazivni napon ventilnog odvodnika jednak je najvišem naponu na mjestu ugradnje odvodnika. Odabrani nazivni napon odvodnika mora biti jednak ili veći od najviše efektivne vrijednosti napona pogonske frekvencije, koja se na mjestu ugradnje odvodnika može pojaviti u normalnom pogonu i za vrijeme kvara. Da se odredi taj najviši nivo, dovoljno je odrediti napon u zdravim fazama u slučaju spoja sa zemljom jedne od faza. Koliki nazivni napon odvodnika treba odabrati ovisi o najvišem efektivnom linijskom naponu mreže i o najvišem efektivnom naponu između zdrave faze i zemlje za vrijeme spoja sa zemljom jedne od faza u bilo kojoj tački mreže, što ovisi o načinu uzemljenja nul-tačke mreže.

Nazivni napon odvodnika možemo odrediti tzv. koeficijentom uzemljenja, koji je definiran omjerom između najvišeg efektivnog napona zdrave faze prema zemlji za vrijeme kvara i najvišeg linijskog napona u normalnom pogonu. U mreži s neposredno uzemljenom nul-tačkom koeficijent uzemljenja ne prelazi 0,8, što je normalno ispunjeno kad je omjer između nulte i direktne reaktancije mreže veći od 0, a manji od 3. Tada nazivni napon odvodnika mora iznositi barem 80% najvišeg linijskog napona mreže. U nekim visokonaponskim mrežama koeficijent uzemljenja ne prelazi 0,75, pa u takvim slučajevima nazivni napon smije iznositi 75% najvišeg linijskog napona. U mrežama s indirektno uzemljenom nul-tačkom koeficijent uzemljenja može prijeći 0,8, a u mrežama s kompenziranom strujom zemnog spoja može biti i veći od 1,00, što je slučaj s koeficijentom uzemljenja i u mrežama s izoliranom nul-tačkom. Nazivni napon odvodnikâ spojenih između faze i zemlje određen je u svim slu-



Slika 4.179. Ovisnost napona o struji kroz nelinearni otpornik prema (4.240) za različite vrijednosti eksponenta n

čajevima kao produkt koeficijenta uzemljenja i najvišeg linijskog napona. U nacrtu preporuke IEC bilo je predviđeno da nazivni napon odvodnika u zvjezdištu transformatora za mreže s izoliranom ili posredno uzemljenom nul-tačkom iznosi 60%, a za mreže s direktno uzemljenom nul-tačkom 40% najvišeg linijskog napona mreže. To pitanje, međutim, nije potpuno raščišćeno, jer se mišljenja i dosadašnja iskustva u pojedinim zemljama razlikuju, pa se u novijim nacrtima preporuka IEC pitanje odvodnika napona u zvjezdištu transformatora niti ne tretira.

Druga je karakteristika ventilnih odvodnika nazivna struja rasterećenja. Proizvode se odvodnici za četiri nazivne struje rasterećenja: 1,5, 2,5, 5 i 10 kA. Za 10 kA razlikujemo odvodnike za normalne i za teže uvjete rada. Odvodnik za teže uvjete rada mora biti sposoban da izdrži i u slučaju da proradi pri unutarnjim prenaponima, jer takvi prenaponi normalno dulje traju od atmosferskih. Prema njemačkim propisima odvodnik mora biti sposoban da izdrži, a da se ne ošteti, 30 uzastopnih udarnih valova struje s tjemenom vrijednošću koja je jednaka nazivnoj struji s trajanjem čela vala od 10 μs i s trajanjem hrbata 20 μs.

U tab. 4.21. navedena su ispitivanja prema IEC i našim standardima, koja moraju da izdrže ventilni odvodnici a da se ne oštete.

Osim toga, odvodnik priključen na normalni izmjenični napon mora izdržati 20 strujnih valova oblika 8/20 μs sa tjemenom vrijednošću jed-

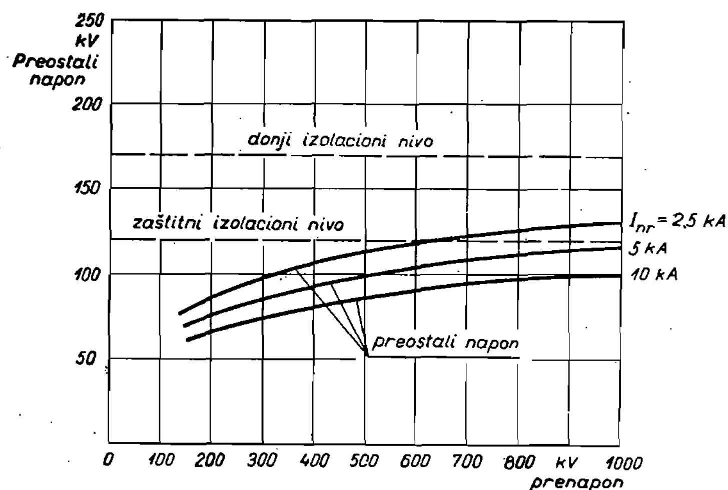
TABLICA 4.21.

Veličine struja za ispitivanje ventilnih odvodnika prenapona
(prema IEC)

	Nazivna struja ventilnog odvodnika			
	10 kA	5 kA	2,5 kA	1,5 kA
Ispitivanje dugim pravokutnim valom:				
struja (A)	150	75	50	ne traži se
trajanje (μs)	2000	1000	500	
Ispitivanje kratkotrajnim udarnim valom (4/10 μs):				
struja (kA)	100	65	25	10

nakom nazivnoj struji rasterećenja (četiri grupe po 5 valova, vremenski razmak među grupama 25 do 30 minuta, a vremenski razmak među valovima u grupi 50 do 60 sekunda). Nakon ispitivanja proradni napon ne smije se promijeniti za više od 10%, a preostali napon za više od 8%, u usporedbi s naponima prije ispitivanja. Ispitivanja, međutim, pokazuju da ventilni odvodnici veće nazivne struje rasterećenja za isti prenapon imaju manji preostali napon (sl. 4.180), što može utjecati na izbor karakteristika ventilnog odvodnika.

Za niske napone odvodnici se izrađuju za nazivnu struju rasterećenja od 1,5 i 2,5 kA, za napone 3 do 25 kV za 2,5, 5 i 10 kA, za napone od 25 do 123 kV za 5 i 10 kA, dok za napone od 123 kV i više samo za nazivnu struju rasterećenja od 10 kA. U Sjedinjenim Američkim Državama uve-

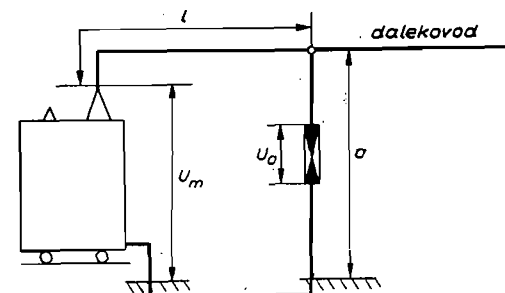


Slika 4.180. Utjecaj nazivne struje rasterećenja (I_{nr}) ventilnog odvodnika i prenapona na preostali napon (primjer za odvodnik nazivnog napona 35 kV)

deni su posebni nazivi ventilnih odvodnika prema nazivnoj struji rasterećenja: station type-heavy duty type (stanični tip — tip za velike zahtjeve) za odvodnik nazivne struje od 10 kA, intermediate type (srednji tip) za 5 kA, distribution type-line type (distributivni tip — linijski tip) za 2,5 kA i secondary type (sekundarni tip) za 1,5 kA.

Općenito se može reći da efikasnost, odnosno neefikasnost zaštite od direktnog udara groma igra veliku ulogu pri izboru nazivne struje rasterećenja. Pod efikasno zaštićenim postrojenjem smatra se postrojenje u kojem su, osim njega samog, zaštićeni od direktnog udara groma i svi priključeni vodovi pomoću zaštitnih užeta, na duljini od barem 1000 m od postrojenja. U neefikasno zaštićena postrojenja treba postaviti odvodnike s većim nazivnim strujama rasterećenja, jer su izložena direktnim udarima groma. Raspored samog postrojenja utječe na izbor nazivne struje rasterećenja. U slučaju kad je na transformatorsku stanicu priključeno više vodova, val — koji dolazi jednim vodom — grana se i na ostale vodove, pa to smanjuje struju rasterećenja. Dalje moramo pri određivanju nazivne struje rasterećenja znati potrebni zaštitni nivo izolacije, jer kako je već spomenuto, odvodnici veće nazivne struje rasterećenja imaju manji preostali napon.

Efikasnost zaštite odvodnikom ovisna je i o udaljenosti odvodnika od štićenog dijela postrojenja. Prilikom određivanja maksimalne udaljenosti treba uzeti u obzir duljinu voda (sl. 4.181) od mjesta priključka odvodnika



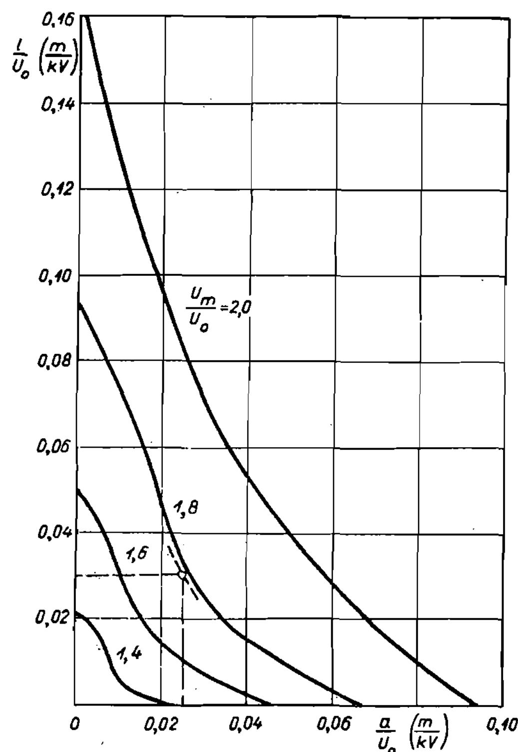
Slika 4.181. Skice smještaja odvodnika

(radi djelovanja refleksije vala) i duljinu vodiča od mjesta priključka odvodnika — uključivši i duljinu samog odvodnika — do njegovog uzemljenja (radi reaktancije vodiča i odvodnika). Može se pretpostaviti (Lit. 83): a) da je strmina vala prenapona od kojeg treba štititi postrojenje 1000 kV/μs, iako se u postrojenjima efikasno zaštićenim od direktnog udara groma ne pojavljuju valovi većih strmina od 500 kV/μs (ta pretpostavka je učinjena da bi se uzeli u obzir i najnepovoljniji slučajevi); b) da je odvodnik izolator sve do napona koji je jednak proradnom naponu, te da nakon prorade ostaje konstantan preostali napon; c) da napon pogonske frekvencije ima tjemenu vrijednost; d) da se transformator u toku prvih nekoliko mikrosekunda od pojave prenapona ponaša kao kondenzator; e) da su uzemljenja odvodnika i štićenog transformatora međusobno kratko spojena, f) da je struja rasterećenja 5 kA (samo u 3,5% slučajeva

— Lit. 83. — pojavljuje se veća struja rasterećenja u efikasno zaštićenim postrojenjima); g) da postoji samo jedan dalekovod (što je najnepovoljniji slučaj) i h) da oprema u postrojenju može izdržati vrlo kratko vrijeme napon definiran relacijom

$$U_m = k\,U_i + \sqrt{\frac{2}{3}}\,U_{max} \qquad \ldots (4.241)$$

Ovdje su: k koeficijent povećanja udarnog izolacionog nivoa opreme s obzirom na oblik prenaponskog vala, jer se radi o nestandardnom valu [može se računati (Lit. 83.) sa $k = 1{,}15$ kao s prvom aproksimacijom], U_i



Slika 4.182. Dijagram za određivanje maksimalno dozvoljenog razmaka između priključka odvodnika i štićenog dijela postrojenja (oznake na sl. 4.181) — crtkano prikazani podaci za primjer u tekstu

donji izolacioni nivo, U_{max} maksimalna efektivna vrijednost linijskog napona (dolazi $^2/_3$ pod korijenom, jer drugi član treba da bude jednak tjemenoj vrijednosti napona prema zemlji u normalnom pogonu). Polazeći od navedenih pretpostavki, određene su krivulje prikazane na sl. 4.182.

Pomoću njih je moguće odrediti maksimalno dopuštenu udaljenost odvodnika od dijela postrojenja koje treba zaštititi. Pri tome je potrebno poznavati još i visinu napona na odvodniku, koju možemo odrediti iz relacije

$$U_o = U_p + \sqrt{\frac{2}{3}}\,U_{max} \qquad \ldots (4.242)$$

gdje je U_p preostali napon struje rasterećenja od 5,0 kA. Da se odredi razmak l (sl. 4.181), potrebno je odrediti omjer između U_m (4.241) i U_o (4.242) i omjer a/U_o. Veličinu a treba izmjeriti u izvedenom ili projektiranom postrojenju. Unošenjem tih dvaju omjera u dijagram na sl. 4.182. dobiva se omjer l/U_o, iz kojega se određuje maksimalno dopušteni razmak l. Treba napomenuti da se može poći od poznatog razmaka l, pa na analogan način odrediti duljinu a.

Pokažimo na primjeru upotrebu dijagrama na sl. 4.182. Neka se radi o vodu 110 kV ($U_{max} = 125$ kV), na čijem se kraju nalazi odvodnik prenapona s veličinom preostalog napona $U_p = 297$ kV, te neka donji izolacioni nivo opreme iznosi $U_i = 525$ kV; a visina $a = 10$ m. Prema navedenim veličinama dobivamo

$$U_m = 1{,}15 \cdot 525 + 0{,}816 \cdot 125 = 604 + 102 = 706 \text{ kV}$$

$$U_o = 297 + 102 = 399 \text{ kV}$$

$$\frac{U_m}{U_o} = \frac{706}{399} = 1{,}77$$

$$\frac{a}{U_o} = \frac{10}{399} = 0{,}025$$

Iz dijagrama (crtkano na sl. 4.182) dobivamo

$$\frac{l}{U_o} = 0{,}030$$

pa je

$$l = 0{,}030 \cdot 399 = 12 \text{ m}$$

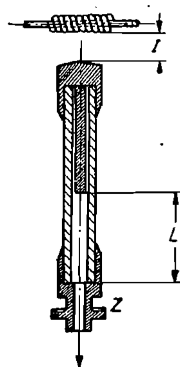
Izračunati maksimalni razmak l vrijedi, naravno, uz navedene pretpostavke. Za rasklopna postrojenja s više vodova istog napona može se razmak l nešto povećati, ali se to ne preporučuje za postrojenja viših napona i za važnija postrojenja zbog zaštite i udaljenijih aparata u štićenom postrojenju.

U postrojenjima neefikasno zaštićenim od direktnog udara groma treba odvodnike postavljati neposredno pred transformatore zbog mogućnosti pojave valova vrlo visokih amplituda i strmina.

Radi sigurnosti da će postavljeni odvodnik u slučaju potrebe izvršiti svoj zadatak, potrebno je svake dvije godine ispitati ventilni odvodnik na proradni napon.

C. Cijevni odvodnici

Cijevni odvodnik je zaštitno iskrište s uređajem za gašenje luka. Nakon paljenja luka struja će protjecati između vodiča i zemlje, s tom razlikom nasuprot ventilnim odvodnicima, da između vodiča i zemlje nema otpornika. Cijevni odvodnik snizit će, dakle, prenapon voda na iznos napona jednak padu napona u luku, koji je znatno niži od zaštitnog nivoa izolacije i znatno niži od preostalog napona ventilnog odvodnika. Struja rasterećenja, koja protječe kroz cijevni odvodnik, jednaka je struji kratkog spoja mreže, pa može oštetiti dijelove mreže ako predugo traje. Radi toga je potrebno osigurati brzo gašenje luka. Cijevni odvodnik ima zbog toga cijev malog promjera (sl. 4.183), od materijala koji se pod utjecajem luka



Slika 4.183. Presjek kroz cijevni odvodnik (jedna od izvedaba). I-iskrište, L-lučna komora

isplinjava (vulkanfiber, tvrda guma, polivinilklorid i sl.). Visokoionizirani plinovi luka miješaju se s plinovima stijenka cijevi, i ta smjesa struji iz cijevi (do 2 m dug plamen), koja je otvorena samo na donjoj strani. U trenutku prolaza struje kroz nulu luk se gasi. U mrežama s malom strujom kratkog spoja može se dogoditi da je količina razvijenih plinova tako malena te ne može osigurati gašenje luka, dok u mrežama s vrlo velikom strujom kratkog spoja velika količina plinova dovodi do eksplozije odvodnika. Prema preporukama IEC predviđaju se dva tipa cijevnih odvodnika: odvodnici nazivne struje 30 kA za zaštitu rasklopnih postrojenja (to je tjemena vrijednost normiranog strujnog vala koji cijevni odvodnik mora izdržati a da se ne ošteti), te nazivne struje 65 kA za zaštitu vodova. Prema istim preporukama odvodnici za postrojenja grade se za maksimalnu struju kratkog spoja (efektivna vrijednost izmjenične komponente) 1,5 i 3,0 kA (do nazivnog napona 18 kV), te još i za 6,0 kA za nazivne napone iznad 18 kV do 40 kV (za više napone nisu predviđeni cijevni odvodnici za zaštitu postrojenja). Za iste odvodnike nije određena minimalna struja kratkog spoja, jer bi oni trebali da prekinu svaku struju kratkog spoja koja se praktički može pojaviti, a manja je od maksimalne struje odvodnika. Odvodnici za vodove, međutim, grade se za nazivne napone od 9 do 25 kV za slijedeće minimalne i maksimalne struje kratkog spoja: 0,3/1,5, 0,4/3,0, 0,6/5,0 i 1,0/10,0 kA, za napone od 30 kV: 0,3/1,5, 0,4/3,0, 0,9/6,0 i 1,0/10,0 kA, a za napone od 40 do 145 kV: 0,3/1,5, 0,4/3,0, 0,9/5,0 i 1,0/10,0 kA. Cijevne odvodnike treba tako odabrati da minimalna

struja kratkog spoja bude veća od minimalne struje odvodnika, a maksimalna struja kratkog spoja na mjestu ugradnje manja od maksimalne struje odvodnika.

S obzirom na nazivne napone cijevnih odvodnika vrijede isti kriteriji kao za ventilne odvodnike.

D. Iskrišta

Zaštitno iskrište sastoji se od dvije elektrode, od kojih je jedna spojena na fazu, a druga na zemlju. Određivanje tehničkih svojstava zaštitnog iskrišta svodi se samo na određivanje razmaka elektroda. U tab. 4.22. navedeni su razmaci elektroda prema IEC (nacrt uputa).

TABLICA 4.22.

Razmaci zaštitnih iskrišta (prema nacrtu uputa IEC)

Najviši napon mreže kV	Razmak iskrišta mm	Najniži preskočni napon 50 Hz kV
12	40	15
24	100	40
36	150	57
72,5	180	107
123 z	470	170
123	610	225
245 z	1070	400

Preskok na iskrištu predstavlja zemni spoj, odnosno kratki spoj u ovisnosti o uzemljenju nul-tačke. U slučaju neposredno uzemljene nul-tačke teći će struje kratkog spoja koje — radi zaštite dijelova postrojenja kroz koje teku te struje — treba isključiti u što je moguće kraćem vremenu. Zbog toga je vrlo korisno upotrijebiti sklopke s jednopolnim ponovnim uklapanjem. Postoji, dalje, opasnost da se luk među elektrodama neće gasiti sam od sebe, pogotovo kad se radi o velikim strujama.

Preskokom na iskrištu nastaje odrezan val, koji dodatno napreže izolaciju namota transformatora radi nejednolike raspodjele napona između zavoja. Ta opasnost je to veća, što je iskrište bliže transformatoru.

Prilikom isklapanja neopterećenih transformatora ili vodova pojavljuju se prenaponi među kontaktima sklopke, koji mogu dovesti do preskoka na iskrištu, što opet dovodi do velike struje među kontaktima sklopke kad su njeni kontakti već rastavljeni. Može se dogoditi da sklopka ne uspije prekinuti tu struju, što će uzrokovati njeno oštećenje.

Radi svega toga zaštitna iskrišta se malo upotrebljavaju.

PETO POGLAVLJE

SHEME SPOJA GLAVNIH STRUJNIH KRUGOVA

5.1. VRSTE SHEMA SPOJA

Izrada sheme spoja prvi je korak pri projektiranju rasklopnog postrojenja. Shema pokazuje koliko će biti generatora, transformatora i odvoda, način njihova međusobnog spoja, predviđene aparate u svakom odvodu i način njihova spajanja, zatim predviđena mjerenja, zaštitu, signalizaciju i upravljanje. Shema, dalje, prikazuje cijelo postrojenje (s više ili manje detalja) s obzirom na njegovo funkcioniranje, ali ne daje prostorni raspored i način izvedbe, što je u većini slučajeva moguće odrediti tek nakon što je određena shema spoja. Izrada shema, međutim, nije od važnosti samo za projektiranje i izgradnju, već i za održavanja u pogonu.

U rasklopnom postrojenju razlikujemo glavne strujne krugove, strujne krugove zaštite i mjerenja, te pomoćne strujne krugove. Glavni strujni krugovi služe za razvod energije, a vodiči koji ih sačinjavaju nalaze se pod visokim naponom. Strujni krugovi zaštite i mjerenja najčešće su priključeni na sekundarne stezaljke strujnih ili naponskih transformatora, dok su pomoćni strujni krugovi najčešće napajani iz pomoćnog izvora istosmjerne struje.

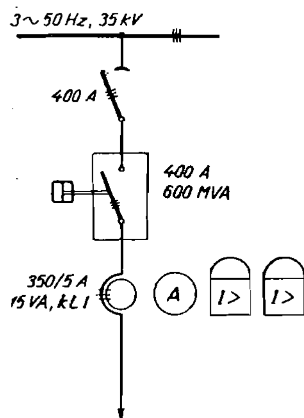
Razlikujemo više vrsta shema spoja, a njihova upotreba ovisi o tome što se želi prikazati upotrebljenom shemom i s koliko detalja se želi prikazati rasklopno postrojenje.

Kao osnova za projektiranje služi jednopolná shema spoja, na kojoj su prikazani samo glavni strujni krugovi i to jednopolno, dok su shematski — pored odvoda i bez spojeva — označeni svi mjerni instrumenti i zaštitni releji (sl. 5.1). Na jednopolnoj shemi, osim toga, naznačene su glavne veličine kojima je karakteriziran pojedini aparat ucrtan u shemu.

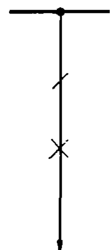
U nekim slučajevima crta se i principna shema, na kojoj su ucrtane samo sabirnica, odvodi, te rastavljači i sklopke, kako bi se dobila slika o međusobnoj povezanosti odvoda. Tada se rastavljače i sklopke prikazuje pojednostavnjenim simbolima (sl. 5.2).

Shema djelovanja (sl. 5.3) prikazuje tropolno sve glavne strujne krugove, kako bi se mogla označiti funkcija svih uređaja u postrojenju, te kontrolirati ispravnost spojeva. Na sl. 5.3. nacrtani su samo vodovi mjerenja i zaštite, dok su — radi pojednostavnjenja prikazivanja — ispušteni vodovi za upravljanje i signalizaciju. Prilikom crtanja sheme djelovanja obično se ne vodi računa o prostornom rasporedu pojedinih aparata.

Na osnovu sheme djelovanja izrađuje se shema vezivanja, koja uzima u obzir prostorni smještaj aparata, a u nju se ucrtane sve stezaljke na aparatima, redne stezaljke od kojih polaze i na kojima završavaju žile

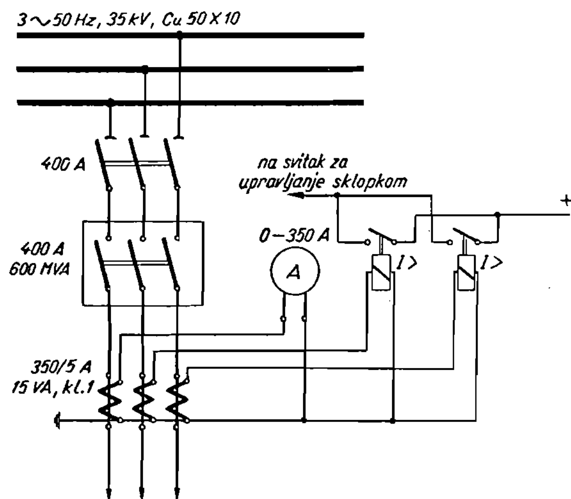


Slika 5.1. Primjer jednopolne sheme spoja



Slika 5.2. Principna shema spoja odvoda na sl. 5.1.

kabela, te kabeli za sve strujne krugove u rasklopnom postrojenju. Shema vezivanja je izvedbena shema na kojoj se, pored ostalog, nalaze i oznake rednih stezaljka koje treba da se poklapaju s oznakama u postrojenju



Slika 5.3. Shema djelovanja odvoda na sl. 5.1. (nacrtani samo vodovi za mjerenje i zaštitu)

Posebna vrst shema jesu strujne sheme, s kojima se obično prikazuju djelovanja pomoćnih strujnih krugova. One se crtaju bez obzira na međusobni prostorni smještaj pojedinih kontakata i aparata, a glavna im je svrha da omoguće jednostavnu i efikasnu kontrolu ispravnosti spoja. Upotreba strujnih shema bit će prikazana u poglavlju o shemama pomoćnih strujnih krugova.

5.2. OPĆENITO O SHEMAMA GLAVNIH KRUGOVA

A. Kriteriji za izbor shema

Kao osnovni kriteriji za izbor sheme glavnih strujnih krugova mogu se navesti: sigurnost pogona, mogućnosti uzdržavanja i pregleda, te ekonomičnost postrojenja. Prilikom ocjene sigurnosti pogona treba uzeti u obzir prilike u mreži unutar koje će biti izgrađeno rasklopno postrojenje, te utjecaj eventualnih kvarova u postrojenju na potrošače, koji će biti napajani iz dotičnog rasklopnog postrojenja. Oštrina zahtjeva u pogledu osiguranja izvođenja radova uzdržavanja i pregleda ovisi o ulozi rasklopnog postrojenja u elektroenergetskom sistemu, kako s obzirom na proizvodnju, tako i s obzirom na opskrbu potrošača, pri čemu naročito treba voditi računa o sigurnosti osoblja koje vrši radove. U nekim rasklopnim postrojenjima može se zahtijevati da se svi radovi na pregledu i uzdržavanju moraju izvršiti bez prekida pogona, ili s prekidom samo u dijelu postrojenja, dok se u nekim slučajevima može dopustiti i prekid pogona za vrijeme jednog dijela tih radova. Pod ekonomičnošću postrojenja razumijevamo zahtjev da se ispune navedeni uvjeti o sigurnosti i mogućnosti remonta sa što manje aparata, a naročito sklopaka kao najskupljih aparata u rasklopnom postrojenju, te da se osigura puno korištenje ugrađenih aparata i transformatora.

Osim tih zahtjeva potrebno je naročito imati u vidu pogonsku elastičnost postrojenja, što je potrebno da bi postrojenje izvršilo svoj zadatak ne toliko u normalnom pogonu, koliko u slučaju kvara kako u postrojenju samom, tako i u mreži. Osim toga elastičnost postrojenja karakterizirana je mogućnošću njegova proširenja, što ne mora baš u svakom slučaju biti osigurano.

Pored svih tih zahtjeva treba da postoji i stalna težnja za pojednostavnjenjem shema radi pojednostavnjenja izvedbe, bolje preglednosti u pogonu i manje vjerojatnosti krivih manipulacija.

Na izbor sheme utječu slijedeće okolnosti: uloga i napon rasklopnog postrojenja (rasklopno postrojenje u elektrani, u prenosnoj, razvodnoj ili distributivnoj mreži); važnost postrojenja u mreži (čvorište elektrana, veza dvaju dijelova mreže i sl.); broj i snaga generatora i transformatora, te broj i važnost priključenih vodova; pogonski zahtjevi, i to posebno zahtjev za odvojenim pogonom dijelova postrojenja; potreba proširenja rasklopnog postrojenja; tip i sigurnost upotrebljenih aparata; posebni zahtjevi na održavanje radi lokalnih prilika (taloženje prašine, zasoljavanje, zaleđivanje); prilike u slučaju kratkog spoja s obzirom na veličinu rasklopne snage, udarnih struja i struja mjerodavnih za ugrijavanje,

naročito kad je potrebno smanjiti struje kratkog spoja (dolazi u obzir za niže napone); potreba priključka pomoćnih pogona (pojavljuje se u većim elektranama).

B. Ocjena sigurnosti shema

Da bi se ocijenila sigurnost pogona, potrebno je u prvom redu poznavati vjerojatnost kvara svakog od elemenata u postrojenju. Pojave kvarova, međutim, ne ovise samo o kvaliteti i konstrukciji ugrađenih dijelova, nego i o uzdržavanju i manipulaciji. Zbog toga je potrebno takve analize temeljiti na iskustvu one mreže, u kojoj će raditi promatrano postrojenje. Zbog ilustracije navedeni su u tab. 5.1. podaci o kvarovima i o trajanju popravka kvarova u SSSR-u (Lit. 84). Da bi se uzela u obzir i potreba održavanja i pregleda, treba poznavati periodičnost remonta i njegovo trajanje. U tab. 5.2. navedeni su radi primjera podaci o rokovima revizije i kontrole (Lit. 85) i njihovo trajanje, prema iskustvima u SSSR-u (Lit. 84).

Poznavajući statistike kvarova, te broj aparata i duljinu vodova, moguće je odrediti broj kvarova u godini i trajanje prekida pogona. Ako sa n označimo broj kvarova na promatranom aparatu ili vodu u godini, sa N broj aparata ($N = 100$) ili broj kilometara voda ($N = 100$) na koji se odnosi broj kvarova n, te ako sa t označimo trajanje prekida kao posljedicu jednog kvara (tab. 5.1), relacija

$$T = \frac{n}{N} t \text{ h/god.} \qquad \ldots (5.1)$$

prikazuje trajanje prekida pogona radi kvarova na jednom aparatu. Ako još T podijelimo s brojem sati u godini (8760 h/god), dobivamo ovu vjerojatnost prekida pogona radi kvara na jednom aparatu

$$p = \frac{T}{8760} = \frac{n}{N} \frac{t}{8760} \qquad \ldots (5.2)$$

TABLICA 5.1.

Prosječni broj kvarova i prosječno trajanje popravka kvarova u SSSR-u (Lit. 84)

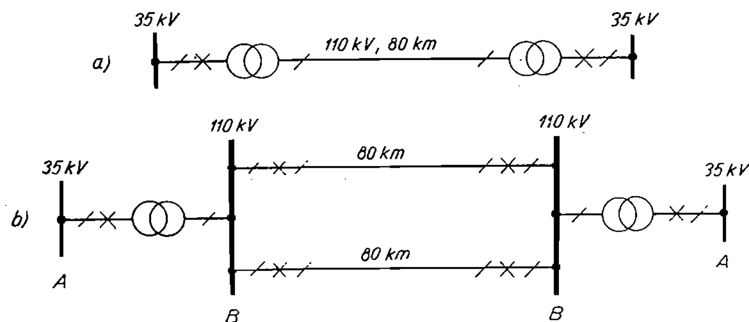
	Količina (N)	Prosječan broj kvarova u godini (n)	Prosječno trajanje popravka kvara (t)	Vjerojatnost kvara $p = \frac{n}{N} \frac{t}{8760}$
Transformatori	100 kom.	0,5	48	$27,4 \cdot 10^{-6}$
Sklopke za 110 kV i više	100 kom.	1,5	8	$13,7 \cdot 10^{-6}$
Sklopke za 20—35 kV	100 kom.	1,0	6	$6,9 \cdot 10^{-6}$
Sklopke za 10 kV i niže	100 kom.	0,5	6	$3,4 \cdot 10^{-6}$
Rastavljači svih napona	100 kom.	0,01	4	$0,05 \cdot 10^{-6}$
Zračni vodovi, 100 kV i više	100 km	1,0	5	$5,7 \cdot 10^{-6}$
Zračni vodovi, 35 kV i niže	100 km	2,5	3	$8,6 \cdot 10^{-6}$

TABLICA 5.2.

Periodičnost i trajanje revizije i pregleda (Lit. 84 i 85)

	Periodičnost (n_r)	Trajanje revizije i pregleda t_r sati	Vjerojatnost $p_r = \frac{t_r}{8760}$
Transformatori, revizija	1 put u 3 god. $\left(n_r = \frac{1}{3}\right)$	50 (40—60)	$1,90 \cdot 10^{-3}$
Transformatori, pregled	1 put godišnje ($n_r = 1$)	6 (4—8)	$0,69 \cdot 10^{-3}$
Sklopke 110 kV i više, revizija	1 put godišnje ($n_r = 1$)	24	$2,74 \cdot 10^{-3}$
Sklopke 110 kV i više, pregled	3 puta godišnje ($n_r = 3$)	1,5 (1—2)	$0,51 \cdot 10^{-3}$
Sklopke 35 kV, revizija	1 put godišnje ($n_r = 1$)	9 (8—10)	$1,03 \cdot 10^{-3}$
Sklopke 35 kV, pregled	3 puta godišnje ($n_r = 3$)	1,5 (1—2)	$0,51 \cdot 10^{-3}$
Sklopke 10 kV i niže, revizija	1 put godišnje ($n_r = 1$)	6 (4—8)	$0,69 \cdot 10^{-3}$
Sklopke 10 kV i niže, pregled	1 put godišnje ($n_r = 1$)	6 (4—8)	$0,69 \cdot 10^{-3}$
Sabirnice, revizija	1 put godišnje ($n_r = 1$)	5 (4—6)	$0,57 \cdot 10^{-3}$

Postojanjem više aparata i transformatora spojenih u seriju (sl. 5.4a), a uz pretpostavku da kvar na jednom elementu sheme ne utječe na ostale elemente, povećava se vjerojatnost kvara, koja se može odrediti kao zbroj vjerojatnosti kvarova na elementima spojenim u seriju. Ako sa p_R, p_S,



Slika 5.4. Primjeri shema za izračunavanje vjerojatnosti prekida pogona

p_T i p_V označimo vjerojatnosti kvara na rastavljaču, sklopki, transformatoru odnosno vodu, a sa b_R, b_S, b_T i b_V broj tih elemenata spojenih u seriju, vjerojatnost kvara za shemu na sl. 5.4a odredit ćemo iz relacije

$$p = b_R p_R + b_S p_S + b_T p_T + b_V p_V \qquad \ldots (5.3)$$

Za shemu na sl. 5.4a vjerojatnost kvara iznosi — uzimajući u obzir podatke iz tab. 5.1.

$$p = (4 \cdot 0{,}05 + 2 \cdot 6{,}9 + 2 \cdot 27{,}4 + 80 \cdot 5{,}7) \cdot 10^{-6} =$$
$$= (0{,}2 + 13{,}8 + 54{,}8 + 456{,}0) \cdot 10^{-6} =$$
$$= 524{,}8 \cdot 10^{-6} = 0{,}52 \cdot 10^{-3}$$

Ako su dijelovi ili elementi postrojenja spojeni paralelno, te ako kvar u jednoj paralelnoj grani ne utječe na pogon druge paralelne grane (postojanje selektivne zaštite!), vjerojatnost kvara na obje paralelne grano istodobno iznosi

$$p = p_1 p_2 \qquad \ldots (5.4)$$

gdje su p_1 vjerojatnost kvara na jednoj, a p_2 na drugoj grani. Ako postoji n paralelnih grana, vjerojatnost istodobnog kvara na svim granama iznosi

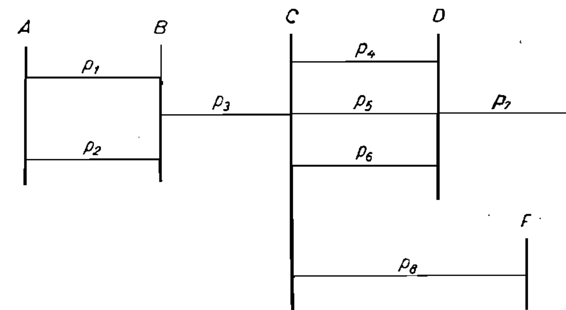
$$p = p_1 p_2 \ldots p_n \qquad \ldots (5.5)$$

Da to ilustriramo, poslužimo se shemom sa sl. 5.5, te odredimo vjerojatnost prekida pogona između sabirnica A i E, te sabirnica A i F. U prvom slučaju vjerojatnost prekida pogona iznosi

$$p_{AE} = p_1 p_2 + p_3 + p_4 p_5 p_6 + p_7$$

a u drugom slučaju

$$p_{AF} = p_1 p_2 + p_3 + p_8$$



Slika 5.5. Primjer sheme za određivanje vjerojatnosti prekida pogona (p-vjerojatnost prekida pogona na dijelu sheme)

Analogno tome možemo odrediti vjerojatnost prekida pogona za shemu na sl. 5.4b. Budući da se radi o istim elementima između sabirnica 110 i 35 kV, te o istim između dva sistema sabirnica 110 kV, možemo postaviti

$$p_{AA} = 2\, p_{AB} + p_{BB}^2$$

Uzimajući u obzir podatke iz tab. 5.1, dobivamo

$$p_{AB} = (2 \cdot 0{,}05 + 6{,}9 + 27{,}4) \cdot 10^{-6} = 34{,}4 \cdot 10^{-6}$$
$$p_{BB} = (4 \cdot 0{,}05 + 2 \cdot 13{,}7 + 80 \cdot 5{,}7)\, 10^{-6} = 483{,}6 \cdot 10^{-6}$$

pa je vjerojatnost prekida pogona između sabirnica 35 kV

$$p_{AA} = 2 \cdot 34{,}4 \cdot 10^{-6} + 483{,}6^2 \cdot 10^{-12} =$$
$$= 68{,}8 \cdot 10^{-6} + 0{,}2 \cdot 10^{-6} =$$
$$= 69{,}0 \cdot 10^{-6} = 0{,}07 \cdot 10^{-3}$$

Ako bi, međutim, svaki kvar na jednom od elemenata u paralelno spojenoj grani izazvao prekid pogona u obje grane (svaki kvar je kratki spoj, a ne postoji selektivna zaštita), vjerojatnost prekida pogona za shemu na sl. 5.4b iznosila bi

$$p_{AA}' = 2\,(p_{AB} + p_{AA}) =$$
$$= 2\,(34{,}4 + 483{,}6)\, 10^{-6} =$$
$$= 1036{,}0 \cdot 10^{-6} = 1{,}04 \cdot 10^{-3}$$

Tada su, naime, iste prilike s obzirom na prekid pogona kao da su svi elementi spojeni u seriju.

Uzmemo li u obzir još i potreban remont, dobili bismo veću vjerojatnost prekida pogona. Pri određivanju vjerojatnosti prekida zbog revizija i remonta treba uzeti u obzir da se istodobno mogu vršiti remonti na cijelom nizu elemenata, a za trajanje prekida pogona mjerodavan je onaj elemenat, čiji je remont najdulji. Ako se, međutim, radi o paralelno spojenim elementima — ukoliko oni mogu preuzeti ukupno opterećenje — njihov remont ne dovodi do prekida pogona.

SKLOPKA = PREKIDAČ

5.3. SHEME SPOJA DIJELOVA POSTROJENJA

Naravno da nije moguće prikazati sve slučajeve do kojih može doći u praksi, pogotovo kad se radi o većim i kompliciranijim postrojenjima. Potrebno je, međutim, poznavati principe i mogućnosti izvedbe shema za pojedine dijelove postrojenja.

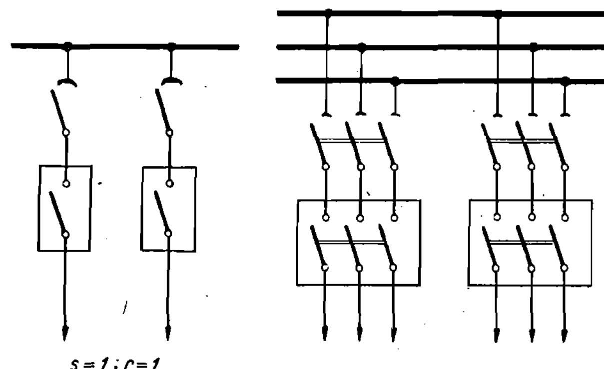
Treba naglasiti da su prilikom razmatranja shema spoja pojedinih dijelova postrojenja ucrtani samo oni aparati koji su značajni za izlaganje, dok su ispušteni — radi preglednosti — oni elementi na koje ne utječe razmatrano pitanje.

A. Shema priključka odvoda

Ako u rasklopnom postrojenju postoje sabirnice, svaki odvod priključen je na sabirnice preko rastavljača, koje nazivamo sabirničkim rastavljačima. Tek iza sabirničkih rastavljača — promatrano sa sabirnica — dolaze ostali aparati (sklopke, osigurači, mjerni transformatori i sl.). Redoslijed ostalih aparata i njihova upotreba ovise o vrsti odvoda i o njegovoj ulozi u mreži i rasklopnom postrojenju.

a) Jednostruke sabirnice

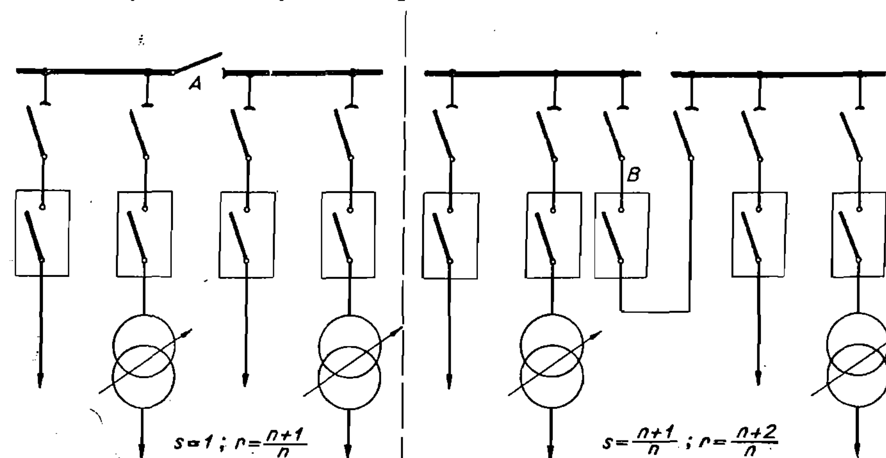
U rasklopnom postrojenju s malo odvoda dovoljne su jednostruke sabirnice (sl. 5.6), ako se uopće želi postrojenje sa sabirnicama. U tom



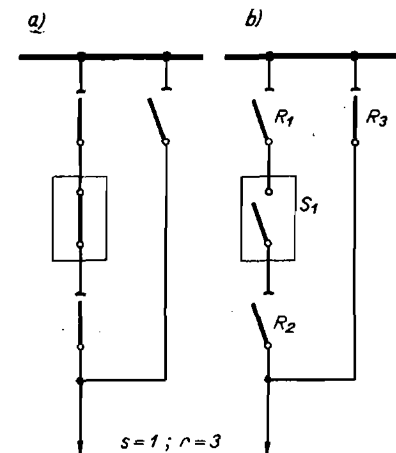
Slika 5.6. Priključak odvoda na jednostruke sabirnice (jednopolna i tropolna shema spoja)

slučaju svaki rad (čišćenje, izmjena sumnjivih izolatora, pregled spojeva i sl.) i svaki kvar na sabirnicama zahtijeva obustavu pogona cijelog rasklopnog postrojenja, pa svi odvodi ostaju bez napona, a potrošači priključeni na rasklopno postrojenje bez energije. Ni radovi (godišnja revizija traje nekoliko sati), a niti kvarovi na sabirnicama nisu tako česti da bi to isključivalo upotrebu jednostrukih sabirnica. To pogotovo vrijedi ako na rasklopno postrojenje nisu priključeni vrlo osjetljivi potrošači, kojima bi prekid dobave električne energije značio veliku štetu ili mogao izazvati

nesreću. Izgradnjom postrojenja s jednostrukim sabirnicama prema sl. 5.6. unaprijed je određen priključak svih vodova na isti napon, jer su spojeni s istim sabirnicama, pa se napon na sabirnicama mora održavati na onoj visini koja će zadovoljavati sve potrošače.



Slika 5.7. Jednostruke sabirnice s uzdužnim rastavljačem (A) i uzdužnom sklopkom (B)



Slika 5.8. Jednostruke sabirnice s premoštenjem sklopke

Da se omogući odvojen pogon pojedinih potrošača, može se u sabirnice postaviti uzdužni rastavljač (sl. 5.7a). Rastavljačem je moguće podijeliti odvode u dva dijela, što omogućuje odijeljeno napajanje preko posebnih transformatora (kao na sl. 5.7a) ili posebnih generatora, pa se prema tome

mogu na svakom dijelu sabirnica održavati različiti naponi (naravno u uskim granicama oko nazivnog napona mreže). U tom slučaju je potrebno da budu u skladu mogućnosti transformacije (odnosno proizvodnje) s potrebama odvoda na pojedinim dijelovima sabirnica, pa odvojeni pogon obično dovodi do slabijeg iskorištenja transformatora (odnosno generatora). Grupiranje odvoda treba odrediti već prilikom izgradnje, pa to može izazvati poteškoće u kasnijem razvoju. Osim toga, pri prijelazu od pogona sa zatvorenim na onaj s otvorenim uzdužnim rastavljačem, potreban je prekid pogona barem na jednom dijelu sabirnica, da se omogući isklapanje rastavljača. Da bi se izbjegao prekid pogona može se postaviti uzdužna sklopka (sl. 5.7b) u sabirnice, što povećava elastičnost rasklopnog postrojenja, ali povećava i investicije, uza sve ostale mane uzdužnog rastavljača.

Uz sheme su navedeni podaci o prosječnom broju sklopaka *(s)* i rastavljača *(r)* po odvodu. Tako npr. za shemu na sl. 5.7b prosječni broj sklopaka po odvodu iznosi

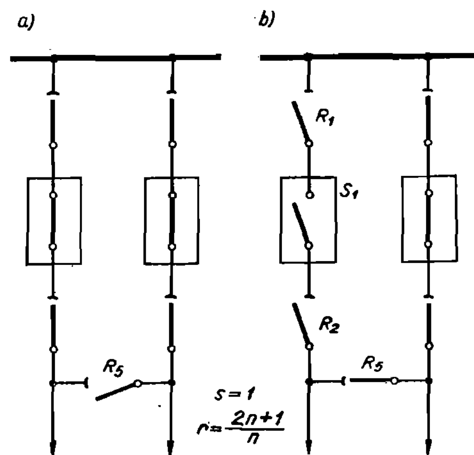
$$s = \frac{n+1}{n}$$

(n = broj odvoda), jer svaki odvod ima jednu sklopku, a osim toga postoji uzdužna sklopka u sabirnicama. Za istu shemu prosječni je broj rastavljača po odvodu

$$r = \frac{n+2}{n}$$

jer su pored sabirničkog rastavljača za svaki odvod potrebna još dva rastavljača za priključak uzdužne sklope.

Kontinuitet pogona može se povećati postavljanjem premoštenja pomoću rastavljača (sl. 5.8). U slučaju kvara sklopke na jednom odvodu



Slika 5.9. Jednostruke sabirnice s poprečnim rastavljačem među dva odvoda

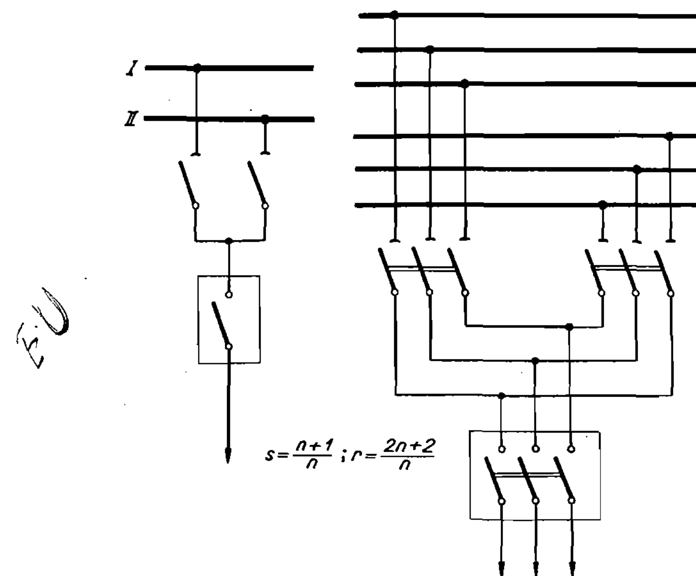
(S_1 na sl. 5.8) odvod se priključuje na sabirnice preko rastavljača R_3, dok rastavljači R_1 i R_2 ostaju otvoreni. Kratki spoj na tako napajanom dovodu isključit će sklopke drugih odvoda kroz koje protječe struja kratkog spoja, što će dovesti do prekida napajanja i svih ostalih dovoda.

Do povećanja kontinuiteta pogona dovodi i shema (sl. 5.9) s poprečnim rastavljačem među dva odvoda. U normalnom je pogonu rastavljač R_5 otvoren (sl. 5.9a), a svaki vod priključen na sabirnice preko vlastite sklopke, dok je u slučaju kvara ili revizije sklopke S_1 (sl. 5.9b) rastavljač R_5 zatvoren, rastavljači R_1 i R_2 ostaju otvoreni, a oba se odvoda napajaju preko zajedničke sklopke. Kvar na jednom odvodu dovodi do prekida pogona obaju odvoda spojenih na zajedničku sklopku.

b) Dvostruke sabirnice

Dvostrukim sabirnicama znatno se povećava elastičnost u pogonu, što je glavna prednost takvih sabirnica, pa se zbog elastičnosti u prvom redu i grade takva rasklopna postrojenja. Naravno da se izgradnjom dvostrukih sabirnica povećava i sigurnost u pogonu, omogućuju čišćenja i popravci jednih sabirnica a da se ne prekida pogon na drugom sistemu sabirnica.

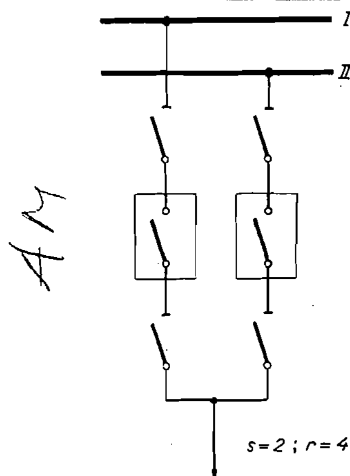
Svaki odvod može se priključiti bilo na jedne, bilo na druge sabirnice, pa su za to potrebna i dva sabirnička rastavljača (sl. 5.10), dok ostala glavna oprema odvoda ostaje nepromijenjena u usporedbi s izvedbom sa jednostrukim sabirnicama. Priključak odvoda na dvostruke sabirnice,



Slika 5.10. Priključak odvoda na dvostruke sabirnice (jednopolna i tropolna shema spoja) — U broju sklopaka i rastavljača ubrojena sklopka i dva rastavljača u spojnom polju

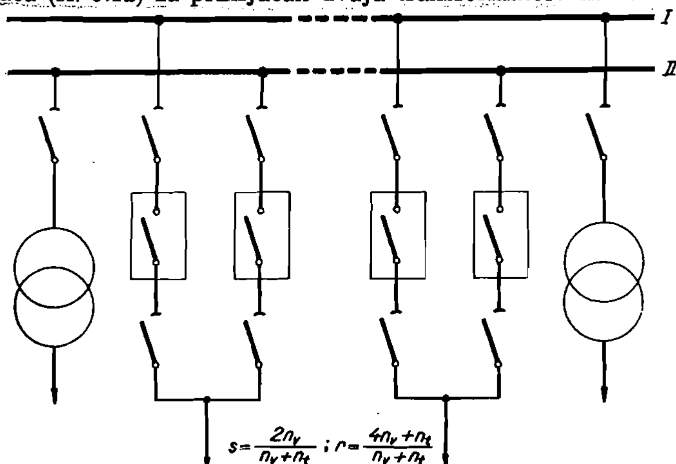
prikazan na sl. 5.10, najjednostavnija je izvedba, pa se najčešće i upotrebljava (evropska izvedba).

Moguće su izvedbe (sl. 5.11) sa dvije sklopke po odvodu (američka izvedba), čime je povećana sigurnost, jer u slučaju kvara ili revizije jedne sklopke odvod je u potpunosti opremljen. No takva izvedba traži povećane investicije radi dvostrukog broja sklopaka i rastavljača. Izostavljanjem rastavljača iza sklopke (gledano od strane sabirnica) ne bi se mnogo postiglo, jer se ne bi moglo pristupiti popravku ili reviziji jedne sklopke dok je odvod pod naponom.



Slika 5.11. Priključak odvoda na dvostruke sabirnice s dvije sklopke po odvodu

Priključak odvoda sa po dvije sklopke omogućava upotrebu samo rastavljača (sl. 5.12) za priključak dvaju transformatora na sabirnice (što

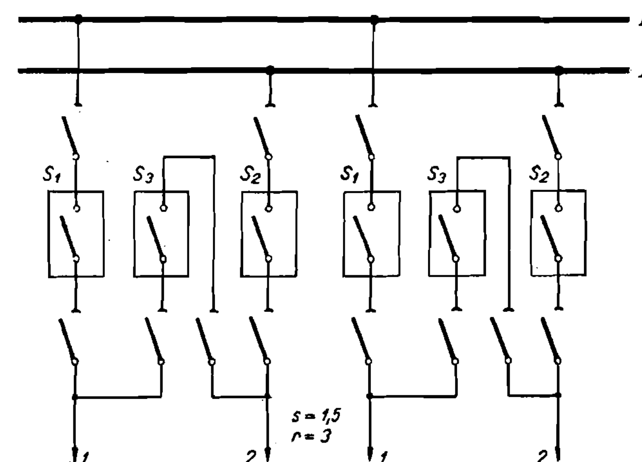


$$s=\frac{2n_v}{n_v+n_t}\ ;\ r=\frac{4n_v+n_t}{n_v+n_t}$$

Slika 5.12. Mogucnost priključka transformatora na dvostruke sabirnice s po dvije sklopke po odvodu (n_v = broj vodova, n_t = broj transformatora = 2)

nije moguće kad se upotrijebe ranije navedene sheme). Za uklapanje i isklapanje transformatora, koji su spojeni svaki na svoje sabirnice, upotrebljavaju se sklopke odvoda. Zaštita transformatora djeluje na sklopke priključene na vlastite sabirnice transformatora. Kvar na jednim sabirnicama ne dovodi do prekida pogona ni na jednom od odvoda, jer se pogon normalno vodi s uključenim svim sklopkama i rastavljačima. Uz opisanu mogućnost svodi se broj sklopaka i rastavljača na manju količinu, nego što na prvi pogled izgleda. Ovo relativno smanjenje to je veće, što je manji broj odvoda.

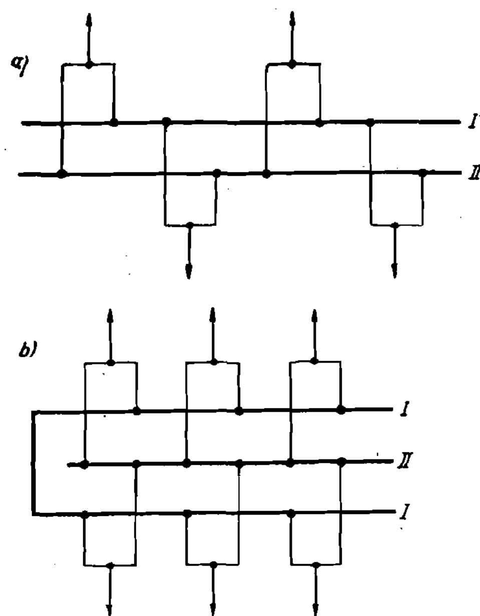
Ako ne postoji transformacija u rasklopnom postrojenju, upotreba sheme sa dvije sklopke po odvodu dovodi do znatnog povećanja investicija, što je vrlo rijetko opravdano, pogotovo s obzirom na sigurnost modernih sklopaka. Smatra se, naime, da ta shema daje veću sigurnost nego što je normalno potrebna.



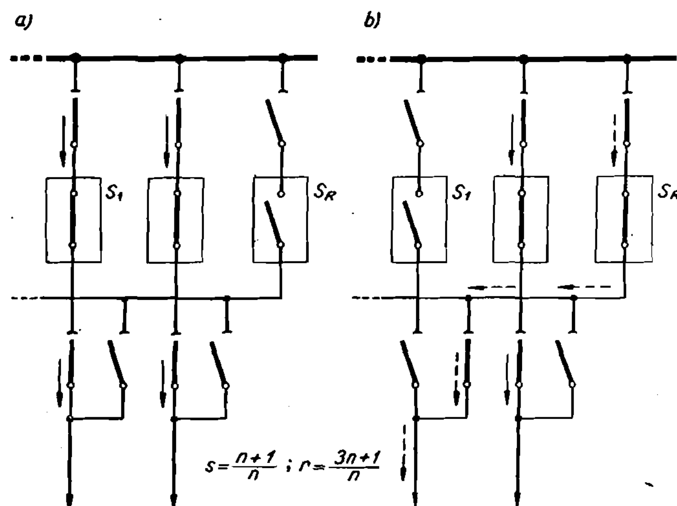
Slika 5.13. Priključak odvoda na dvostruke sabirnice s tri sklopke za dva odvoda

Na sl. 5.13. prikazana je izvedba sa tri sklopke za dva odvoda, koja omogućuje međusobno spajanje odvoda i mimo sabirnica. Priključak obaju odvoda na sabirnice I vrši se uklapanjem sklopaka S_1 i S_3, a na sabirnice II uklapanjem sklopaka S_2 i S_3. U slučaju odvojenog pogona odvoda uključene su sklopke S_1 i S_2, a isključena sklopka S_3. Ako se želi mimoići i sabirnice I i sabirnice II, uključuje se samo sklopka S_3. Nemoguće je, međutim, odvod 1 priključiti na sabirnice II uz istodoban prekid pogona odvoda 2.

Shema spoja sa tri sklopke za dva odvoda srednje je rješenje između sheme spoja na sl. 5.10. i 5.11, jer treba u prosjeku 1,5 sklopaka po odvodu. Shema spoja sa tri sklopke za dva odvoda nije našla primjenu u Evropi zbog relativno visokih troškova izvedbe i relativno male elastičnosti u pogonu. Nasuprot tome, ona osigurava znatnu sigurnost u pogonu. Pogon postrojenja prema takvoj shemi zamišljen je s uklopljenim svim sklop-



Slika 5.14. Sheme dviju izvedaba dvostrukih sabirnica



Slika 5.15. Priključak odvoda na jednostruke sabirnice u rasklopnom postrojenju s pomoćnim sabirnicama: (a) normalni pogon, (b) pogon u slučaju kvara sklopke S_1

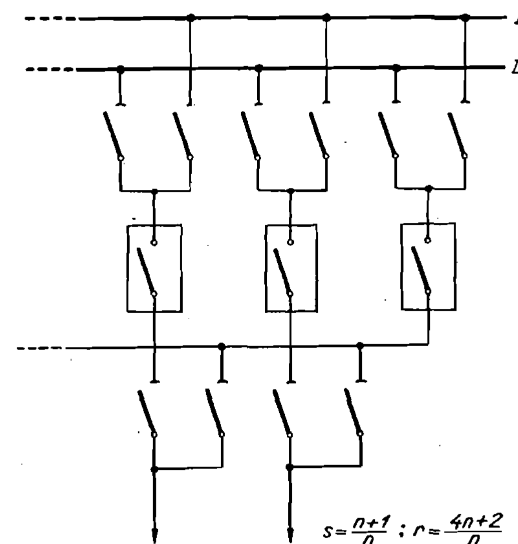
kama i rastavljačima, kad je moguće izvršiti popravak i pregled svake sklopke a da se ne prekida pogon za bilo koji odvod. Kvar na jednim sabirnicama ne dovodi do prekida pogona ni na jednom odvodu.

Osim dvostrukih sabirnica postavljenih prema sl. 5.14a, kada nije moguće postaviti jedan odvod nasuprot drugom, primjenjuje se i raspored sabirnica u obliku slova U (sl. 5.14b), jer time se postiže smanjenje duljine rasklopnog postrojenja za isti broj odvoda. Naravno da se za obje izvedbe može upotrijebiti ista shema spoja odvoda.

U nekim slučajevima — pogotovo u velikim industrijskim postrojenjima, gdje je radi osjetljivosti potrošačkih uređaja s obzirom na prekid dobave energije potrebno imati veliku sigurnost i vrlo elastičnu mogućnost odvojenog pogona — izvode se rasklopna postrojenja s trostrukim, pa i četverostrukim sabirnicama. Priključak odvoda izvodi se u principu kao i sa dvostrukim sabirnicama (sl. 5.10).

c) Pomoćne sabirnice

Izgradnjom pomoćnih sabirnica u postrojenju s jednostrukim sabirnicama omogućeno je uklapanje rezervne sklopke (S_R na sl. 5.15), koja je montirana u rasklopnom postrojenju, u bilo koji odvod jednostavnim uklapanjem rastavljača. Na sl. 5.15a prikazan je položaj rastavljača u normalnom pogonu, a na sl. 5.15b u slučaja kvara na sklopki S_1. Analogno se može postupiti ako je kvar nastao na sklopki bilo kojeg odvoda. Ako nije predviđen odvojen pogon u rasklopnom postrojenju, a potrebno je održati pogon odvoda i za vrijeme kvara i revizije sklopaka, korisno je upotrijebiti shemu s pomoćnim sabirnicama.

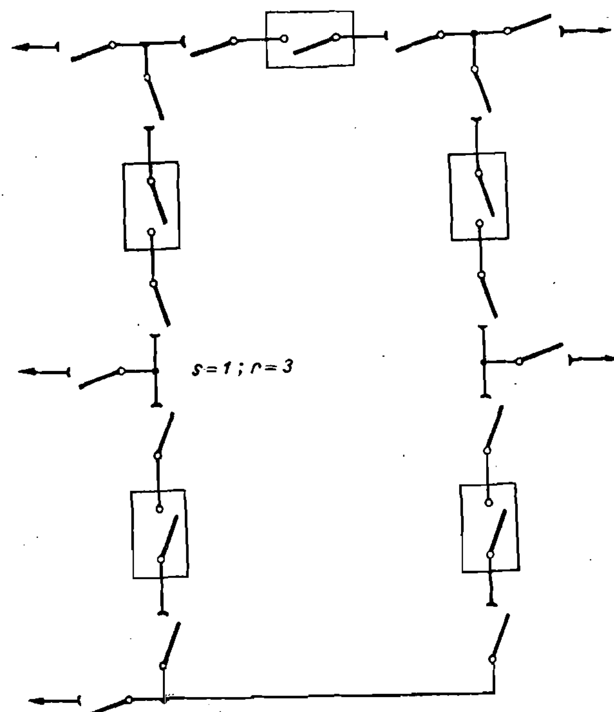


Slika 5.16. Priključak odvoda na dvostruke sabirnice u rasklopnom postrojenju s pomoćnim sabirnicama

Izgradnja pomoćnih sabirnica u postrojenju s dvostrukim sabirnicama (sl. 5.16) može doći u obzir kad je predviđen odvojen pogon glavnih sabirnica, a želi se imati montirana rezerva za sklopke u odvodima. Upotreba rezervne sklopke ista je kao u postrojenju s jednostrukim sabirnicama (sl. 5.15), s tom razlikom što je rezervnu sklopku moguće priključiti na bilo koje glavne sabirnice. Ako, međutim, nisu u pogonu obje glavne sabirnice, postoji mogućnost upotrebe sklopke spojnog polja kao rezervne sklopke i bez pomoćnih sabirnica.

d) Postrojenje bez sabirnica

Kad je predviđeno manje odvoda (3 do 5), mogu se izvesti postrojenja bez sabirnica. Na sl. 5.17. prikazana je shema spoja za pet odvoda. Upotreba prikazane sheme za više od 5 odvoda znatno komplicira izvedbu. Svaki odvod nalazi se između dvije sklopke, što je svakako znak sigurnosti. To se postiže s malo sklopaka ($s = 1$). Radi toga se izvedbom postrojenja prema shemi na sl. 5.17. smanjuju investicije u usporedbi s postrojenjem s jednostrukim i pomoćnim sabirnicama. Obično je ta razlika manja što je odvoda više. Svaku sklopku moguće je pregledati i popraviti a da se ne prekida pogon ni na jednom odvodu. Shema bez sabirnica nije elastična, jer postoji samo jedno normalno uklopno stanje s uključenim



Slika 5.17. Priključak odvoda na postrojenje bez sabirnica

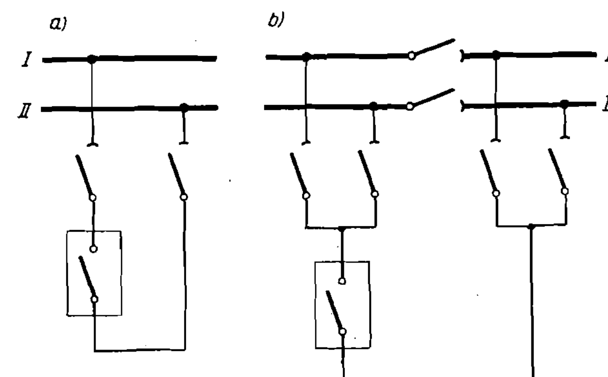
svim sklopkama i rastavljačima, pa za odvojen pogon nastaju znatna ograničenja s obzirom na grupiranje odvoda. Osim toga ne postoji jednostavno rješenje za povećanje broja odvoda u već izgrađenom postrojenju.

Na sheme spoja rasklopnih postrojenja bez sabirnica osvrnut ćemo se u poglavlju o shemama postrojenja s ograničenim brojem odvoda.

B. Spojno polje

a) Izvedba i upotreba

U rasklopnim postrojenjima s dvostrukim (i višestrukim) sabirnicama — izvedba s jednom sklopkom po odvodu (sl. 5.10) — izvodi se normalno i spojno polje (sl. 5.18a), koje omogućuje spajanje dvaju sistema sabirnica, a može poslužiti u različite svrhe. U rasklopnim postrojenjima sa dvije sklopke po odvodu (sl. 5.11) i sa tri za dva odvoda (sl. 5.13) ulogu spojne sklopke može preuzeti bilo koja od njih.

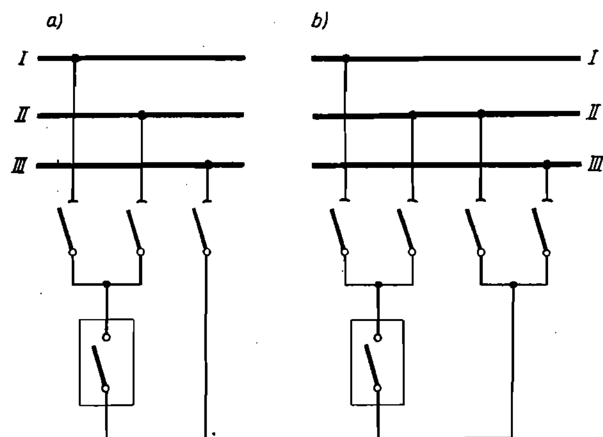


Slika 5.18. Shema spoja spojnog polja u postrojenjima s dvostrukim sabirnicama

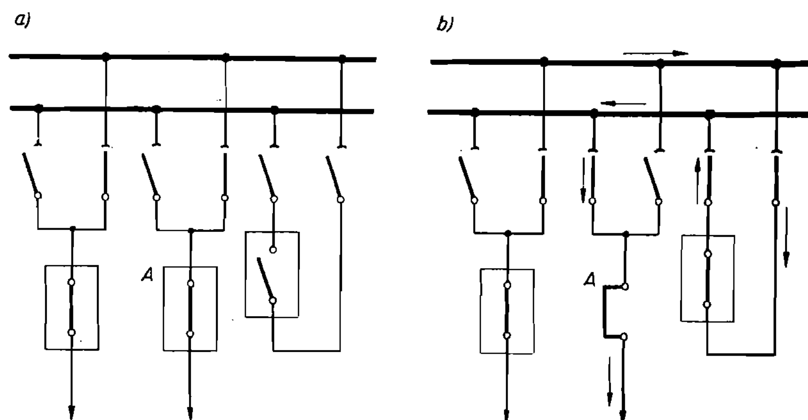
Ukoliko su dvostruke sabirnice uzdužnim rastavljačima podijeljene na dva dijela (sl. 5.18b), u spojnom polju treba predvidjeti po dva rastavljača sa svake strane sklopke, što omogućuje ostvarenje svih kombinacija međusobnog spajanja dijelova sabirnica.

U rasklopnom postrojenju s trostrukim sabirnicama shemom spoja sa sl. 5.19a moguće je ostvariti spajanje sabirnica I i III, te II i III, dok je shemom spoja prikazanom na sl. 5.19b moguće spojiti bilo koja dva sistema sabirnica.

Spojnu sklopku u spojnom polju moguće je upotrijebiti kao rezervnu sklopku u bilo kojem odvodu. Na sl. 5.20a prikazan je položaj sklopaka i rastavljača u normalnom pogonu, a na sl. 5.20b položaj kad je sklopka A u kvaru. U tom slučaju treba sklopku A demontirati, a njezino mjesto premostiti već pripremljenim vodičima. Tada jedna od sabirnica služi kao veza između spojne sklopke i odvoda u kojem je demontirana sklopka, pa je na taj način ta sabirnica neupotrebljiva za druge svrhe. Ako je, naime, kako je već spomenuto, često potreban drugi sistem sabirnica npr.



Slika 5.19. Sheme spojnog polja u postrojenju s trostrukim sabirnicama



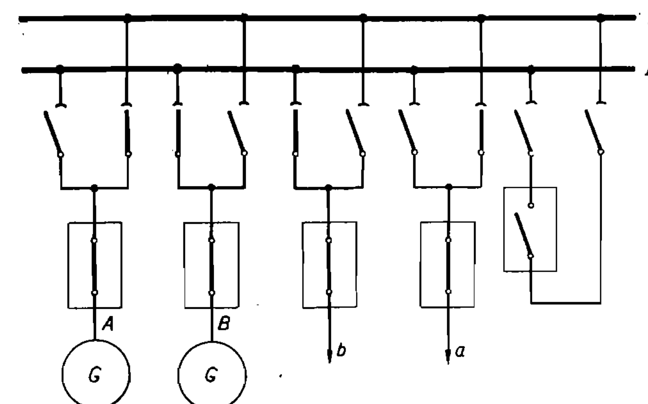
Slika 5.20. Upotreba spojne sklopke za zamjenu sklopke u odvodu

za odvojen pogon dijelova mreže, zamjena demontirane sklopke sa sklopkom u spojnom polju neće biti moguća, pa je u tom slučaju opravdana izvedba s pomoćnim sabirnicama.

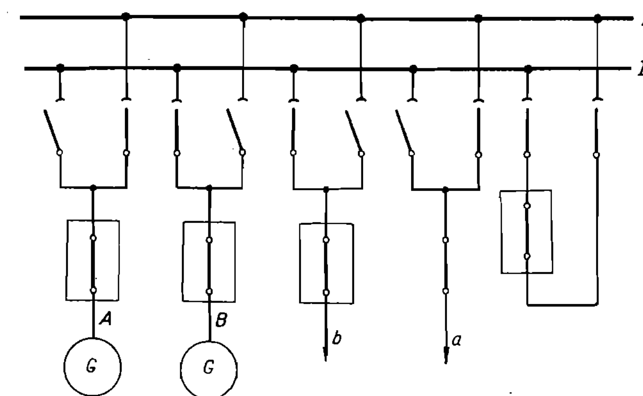
Spojno polje može dalje poslužiti kao sklopka za paralelno spajanje generatora (u elektrani) ili dijelova mreže, koji u nekoj situaciji napajaju odvojena potrošačka područja. U daljnjem izlaganju govorit ćemo o paralelnom spajanju dvaju generatora, iako se to odnosi i na dvije grupe generatora, odnosno na dva dijela elektroenergetskog sistema, u kojima radi i veći broj elektrana. Pretpostavimo, dakle, da se sabirnice I napajaju iz generatora A, a sabirnice II iz generatora B (sl. 5.21), te da je

na sabirnice I priključen vod a, a na sabirnice II vod b. Naravno da se može raditi i o više vodova priključenih na oba sistema sabirnica, no to zbog jednostavnosti prikazivanja nije pretpostavljeno. Odvojen pogon bio je uspostavljen radi potrebe održanja različitih napona, ili iz bilo kakvih pogonskih razloga, što nije rijedak slučaj.

Radi izmijenjenih prilika u mreži potrebno je prijeći na paralelan rad generatora, odnosno na paralelan rad dijelova mreže. Prijelaz na paralelan rad bez spojnog polja može se izvršiti samo isklapanjem sklopke jednog od generatora (npr. generatora B), ali pri tome potrošači koji su bili napajani iz isklopljenog generatora (odvod b) ostaju bez energije. Za vrijeme beznaponske stanke može se izvršiti isklapanje i uklapanje ra-



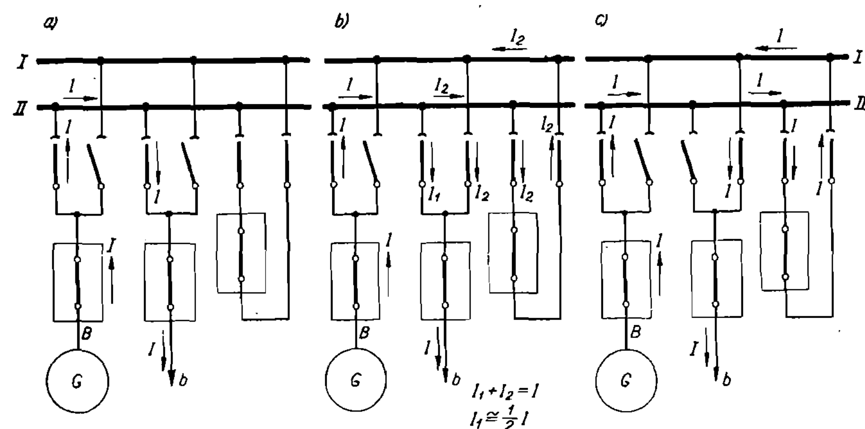
Slika 5.21. Položaj sklopaka i rastavljača u slučaju odvojenog pogona u rasklopnom postrojenju s dvostrukim sabirnicama



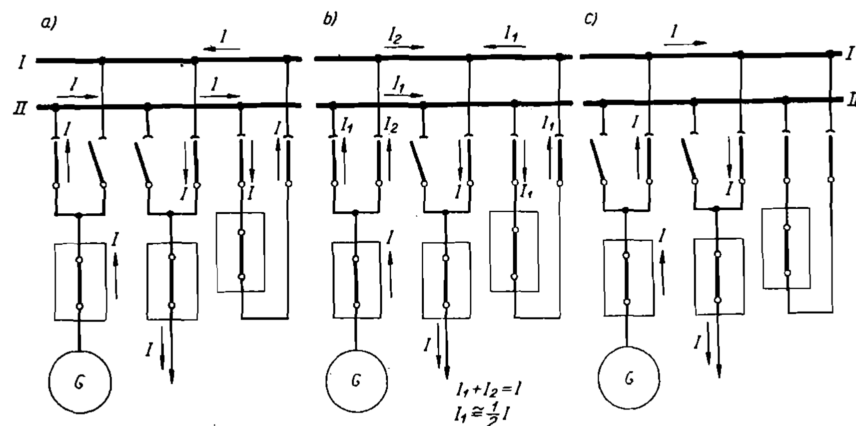
Slika 5.22. Položaj sklopaka i rastavljača nakon sinhronizacije za rasklopno postrojenje na sl. 5.21.

stavljača na odvodima B i b, kako bi se postiglo da svi generatori i odvodi budu spojeni na sabirnice I (konačno stanje prikazano je na sl. 5.25). Nakon toga može se izvršiti sinhronizacija, a uklapanje provesti sklopkom generatora. Može se, dakle, prijeći s odvojenog pogona na pogon s jednim sabirnicama, ali uz prekid opskrbe dijela potrošača. Taj prekid, ma koliko bio kratak, nepoželjan je i treba ga izbjegavati.

Prijelaz bez prekida pogona može se postići upotrebom spojnog polja. U tom slučaju, a nakon što je postignut sinhronizam dvaju generatora, uklapa se spojna sklopka, uz uvjet da su prije uklapanja sklopke uklopljeni i rastavljači spojnog polja. Stanje nakon uklapanja spojne sklopke prikazano je na sl. 5.22. Tada je potrebno prespojiti odvode b i B sa

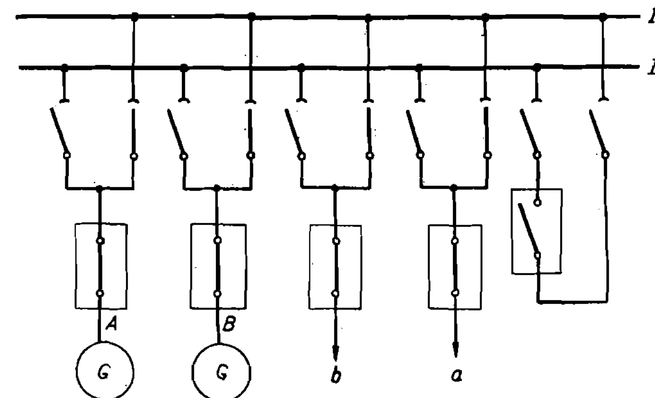


Slika 5.23. Položaj rastavljača i struje prilikom prespajanja odvoda b sa sabirbirnica II na sabirnice I



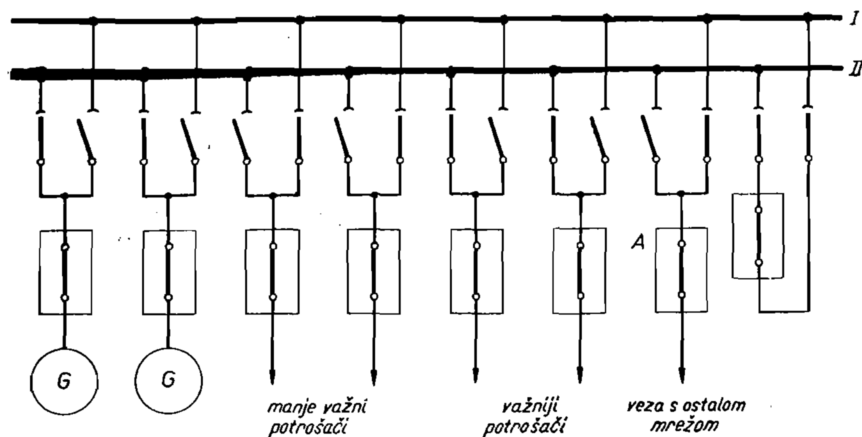
Slika 5.24. Položaj rastavljača i struje prilikom prespajanja odvoda *B* (vidi sl. 5.23) sa sabirnica II na sabirnice I

sabirnica II na sabirnice I. To prespajanje vrši se rastavljačima, kako je prikazano na sl. 5.23. i 5.24, gdje su radi pojednostavnjenja ucrtane samo struje odvoda B i b. Na sl. 5.23a prikazano je stanje koje odgovara onome na sl. 5.22. Budući da su sabirnice međusobno spojene preko spojnog polja, ne postoji zapreka da se uklopi i drugi rastavljač odvoda b (sl. 5.23b). Tada struja iz generatora B dotječe odvodu b djelomično neposredno, a djelomično preko spojnog polja. Nakon toga može se isklopiti bilo koji od rastavljača odvoda b budući da neće doći do prekida strujnog kruga (što bi izazvalo luk među kontaktima rastavljača), jer se strujni krug može zatvoriti preko drugog uklopljenog rastavljača ili neposredno (sl. 5.23a), ili preko spojnog polja (sl. 5.23c). Ako u našem slučaju isklopimo rastavljač koji spaja odvod b sa sabirnicama II (sl. 5.23c), ostat će odvod b priključen na sabirnice I, a struja iz generatora B dotjecat će odvodu b preko spojnog polja. Na taj je način odvod b prespojen na sabirnice I a da se ne prekida pogon. Preostaje još prespajanje odvoda B sa sabirnica II na sabirnice I. Postupak je analogan onome za prespajanje odvoda b kao što je prikazano na sl. 5.24. Nakon prespajanja odvoda B svi su odvodi priključeni na sabirnice I, pa je moguće isklopiti najprije sklopku, a zatim i rastavljače u spojnom polju (sl. 5.25).



Slika 5.25. Položaj sklopaka i rastavljača nakon prijelaza na zajednički pogon na jednim sabirnicama za rasklopno postrojenje na sl. 5.21.

Upotrebu spojnog polja, da se ukaže na različite mogućnosti, ilustrirajmo primjerom koji se može pojaviti u praksi. U shemi spoja na sl. 5.26. spojno polje upotrebljeno je kao veza između važnijih i manje važnih potrošača, s namjerom da se osigura opskrba energije za važnije potrošače. U prikazanom primjeru elektrana radi paralelno s ostalom mrežom preko jednog voda, a generatori elektrane nisu dovoljni, s obzirom na svoju snagu, da opskrbe potrošače priključene na sabirnice elektrane. U slučaju prestanka dobave energije iz mreže generatori će biti preopterećeni, što će dovesti do djelovanja zaštite generatorâ i do isklapanja njihovih sklopaka, te konačno do prestanka opskrbe svih potrošača. Da se to ne dogodi, generatori i važniji potrošači priključeni su na jedne sabirnice (sabirnice



Slika 5.26. Primjer upotrebe spojne sklopke za odvajanje važnih od manje važnih potrošača

II na sl. 5.26), dok se odvodi za manje važne potrošače i odvod A, koji elektranu spaja s ostalom mrežom, spajaju na druge sabirnice (sabirnice I na sl. 5.26). Rastavljači i sklopka u spojnom polju uklopljeni su i spojno polje čini vezu između dva sistema sabirnicâ. Pomoćni spojni krugovi su tako spojeni da se u slučaju ispada sklope u odvodu A isklapa automatski i spojna sklopka, pa na taj način ostaju bez energije manje važni potrošači, ali ne dolazi do preopterećena generatorâ, pa se opskrba važnijih potrošača nastavlja bez prekida.

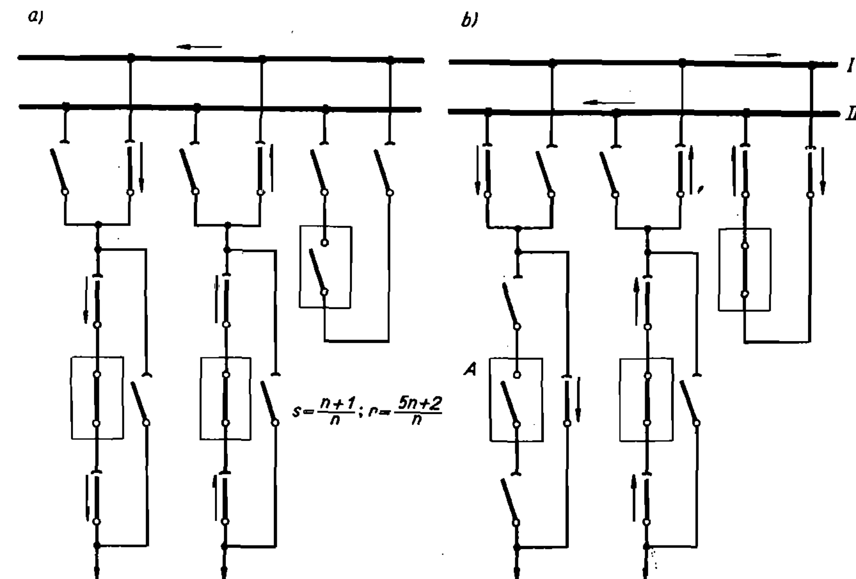
b) Premoštenje sklopke u odvodu

Demontiranje sklopke i premoštenje njezina mjesta svakako znači dulji prekid pogona, pa se na važnim odvodima — pogotovo u rasklopnim postrojenjima najvišeg napona — postavljaju posebni rastavljači za premoštenje sklopke u odvodu, što omogućuje njeno izbacivanje iz pogona za nekoliko minuta, te pregled i eventualni popravak bez demontiranja.

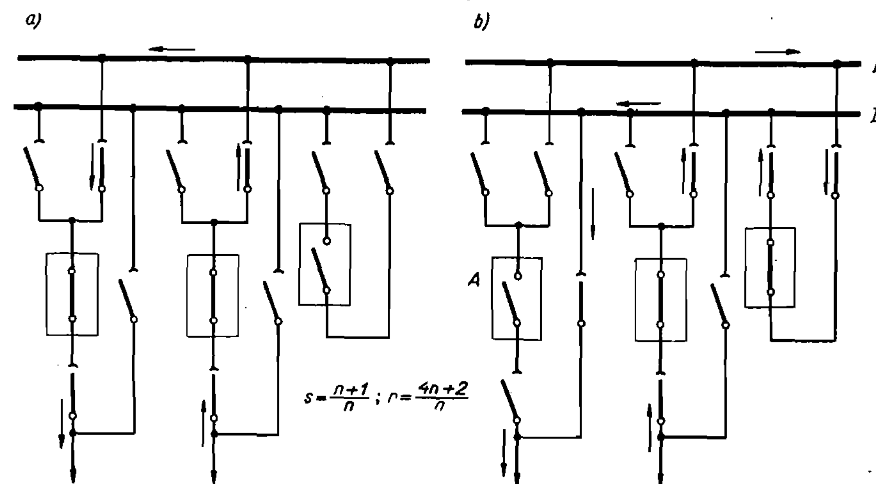
Takvo premoštenje sklopke prikazano je na sl. 5.8. za rasklopno postrojenje s jednostrukim sabirnicama. Tada, međutim, kako je već spomenuto, kvar na vodu uzrokuje isklapanja sklopaka u odvodima koji dovode energiju u to rasklopno postrojenje.

U rasklopnom postrojenju s dvostrukim sabirnicama premoštenu sklopku zamjenjuje spojna sklopka, pa tada premoštenje dobiva punu vrijednost. Na sl. 5.27. i 5.28. prikazane su dvije mogućnosti premoštenja. Na shemama sa sl. 5.27a i 5.28a prikazan je položaj rastavljača u normalnom pogonu, a na shemama sa sl. 5.27b i 5.28b položaj rastavljača za vrijeme kvara na sklopki A.

Shema na sl. 5.27. (izvedba s više rastavljača) elastičnija je, jer je moguće premostiti sklopku bez obzira na koji je sistem sabirnica priključen odvod u kojemu se nalazi sklopka koju treba premostiti. Uz smanjen broj rastavljača (ušteda: jedan rastavljač po odvodu) moguće je rasta-



Slika 5.27. Premoštenje sklopke rastavljačem — izvedba s većim brojem rastavljača



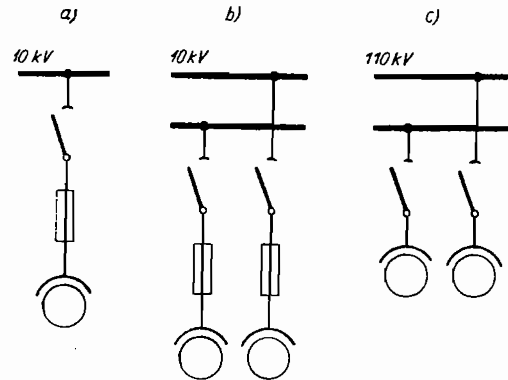
Slika 5.28. Premoštenje sklopke rastavljačem — izvedba s manjim brojem rastavljača

vljač za premoštenje priključiti samo na jedne sabirnice (sabirnice II na sl. 5.28), dok svi ostali odvodi moraju biti spojeni na druge sabirnice.

Naravno da i ovdje vrijedi sve ono što je spomenuto za upotrebu spojne sklopke, kao rezervne, ako su oba sistema sabirnica potrebna za normalan pogon.

C. Mjerno polje

Za mjerenje napona na sabirnicama postavljaju se naponski transformatori, koji se priključuju na sabirnice. Na svaki sistem sabirnica postavlja se poseban slog naponskih transformatora (sl. 5.29). Naponske transformatore priključujemo na sabirnice u pravilu preko sabirničkih rastavljača, a gdje postoje osigurači za nazivni napon sabirnica i preko osigurača (sl. 5.29a i 5.29b). Za napon od 110 kV ne postoje osigurači, pa se na sabirnice 110 kV priključuju naponski transformatori samo preko rastavljača (sl. 5.29c).



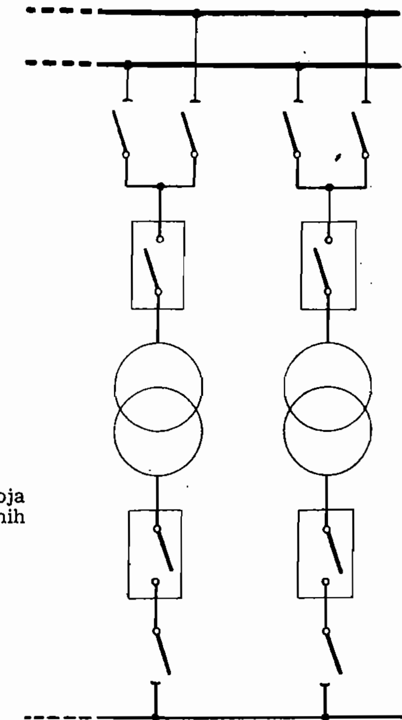
Slika 5.29. Shema spoja naponskih transformatora na sabirnice

Ako se radi o rasklopnom postrojenju bez sabirnica, naponski transformatori se pojavljuju na svim dovodima koji spajaju elektrane s rasklopnim postrojenjima, dakle na vodovima kojima se može dovoditi energija, kako se ne bi dogodilo da zbog položaja rastavljača ili sklopaka dio postrojenja ostane bez mogućnosti mjerenja napona. Tada se normalno naponski transformatori priključuju neposredno (bez rastavljača), jer bi postavljanje rastavljača izazvalo poteškoće u izvedbi.

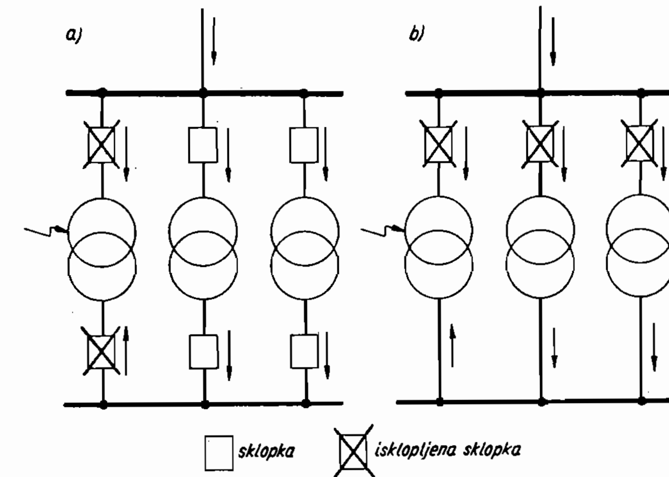
D. Shema spoja transformatora

a) Veza sa sabirnicama

Transformator najčešće povezuje sabirnice različitih napona (sl. 5.30), pa je potrebno na obje strane predvidjeti aparate za uklapanje i isklapanje. Ako u rasklopnom postrojenju postoje dva ili više transformatora koji rade paralelno, potrebno je s obje strane transformatora predvidjeti sklopke koje će biti u stanju da prekinu struju kratkog spoja u slučaju kvara u transformatoru. Tada će, naime, kroz sklopke s obje strane transformatora protjecati struja kratkog spoja, bez obzira na mjesto kvara (sl. 5.31a). Ako ne bi postojale sklopke na sekundarnim stranama transformatorâ, da bi se prekinula struja kratkog spoja trebalo bi iskoristiti ne samo sklopku na



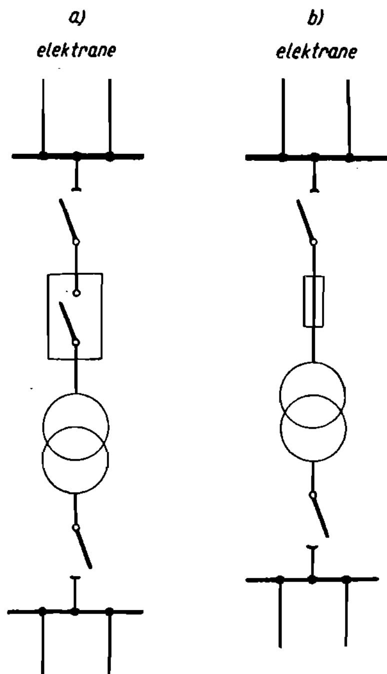
Slika 5.30. Shema spoja dvaju paralelno spojenih transformatora



Slika 5.31. Isklapanje sklopaka zbog kvara na transformatoru u slučaju paralelnog rada više transformatora: (a) sklopke na obje strane, (b) sklopke samo na strani napajanja

oštećenom transformatoru, već i one svih ostalih transformatora (sl. 5.31b). U prvom slučaju dolazi, dakle, do isklapanja — naravno uz pretpostavku da je upotrebljena adekvatna zaštita — samo oštećenog transformatora, dok u drugom slučaju dolazi do obustave pogona cijele transformatorske stanice.

Iste prilike kao u slučaju paralelnih transformatora imamo i onda kad s obje strane transformatora postoje elektrane, a u transformatorskoj stanici je samo jedan transformator. Tada je potrebno postaviti sklopke s obje strane jednog transformatora.



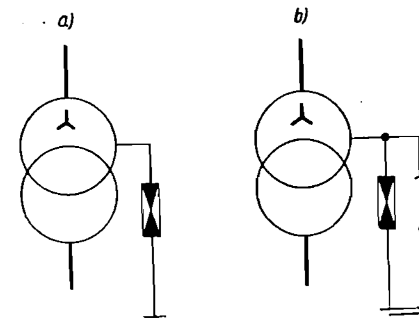
Slika 5.32. Shema spoja kad postoji jedan transformator i napajanje samo s jedne strane

Ukoliko postoji samo jedan transformator, te ako se napajanje može vršiti samo s jedne strane, dovoljno je postaviti sklopku samo na strani dovoda energije (sl. 5.32a), jer će isklapanjem te sklopke biti prekinuta struja kratkog spoja u slučaju kratkog spoja u transformatoru ili na sabirnicama sekundarne strane. Za osiguranje transformatora male snage mogu se mjesto sklopke upotrijebiti osigurači (sl. 5.32b), ali samo kad je moguće rastavljačem prekinuti struju praznog hoda. Naravno da se mjesto običnog rastavljača može upotrijebiti učinski rastavljač bilo u seriji s osiguračem (za veće rasklopne snage), bilo bez osigurača, ako je rasklopna snaga u granicama rasklopne moći učinskog rastavljača.

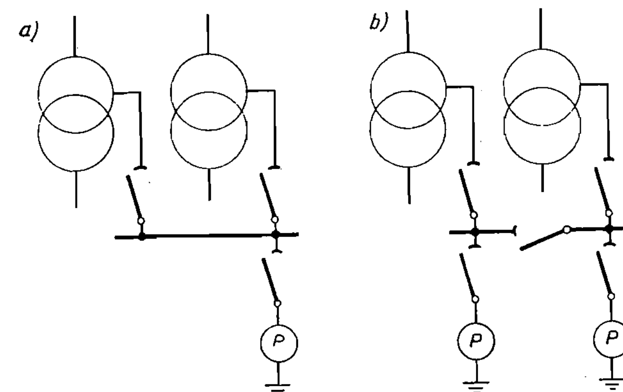
Za tronamotne transformatore potrebno je sa svake strane postaviti sklopku, pa i kad se napajanje vrši samo s jedne strane, jer bi u protivnom slučaju kratki spoj na bilo kojoj strani doveo do isklapanja cijelog transformatora. Kratki spoj na jednoj strani transformatora, međutim, ne onemogućuje transformaciju preko preostalih dvaju namota.

b) Zvjezdište transformatora

Zvjezdište transformatora može biti izolirano prema zemlji, spojeno sa zemljom preko prigušnice ili djelatnog otpora, odnosno neposredno spojeno sa zemljom.



Slika 5.33. Spoj zvjezdišta transformatora sa zemljom: (a) zvjezdište izolirano, (b) zvjezdište neposredno uzemljeno



Slika 5.34. Shema spoja prigušnice za uzemljenje zvjezdišta transformatora

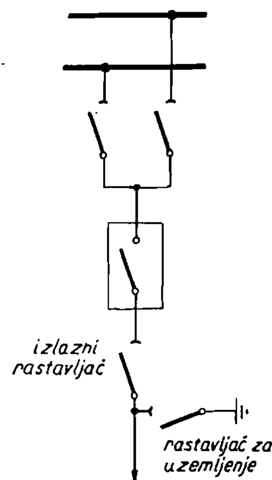
Kad je zvjezdište transformatora izolirano od zemlje, često se između zvjezdišta i zemlje postavlja odvodnik prenapona (sl. 5.33a). Takav odvodnik postavlja se u zvjezdište transformatora i kad je predviđeno nepo-

sredno uzemljenje zvjezdišta, jer se normalno ne uzemljuju svi transformatori. Kad je zvjezdište uzemljeno preko rastavljača (sl. 5.33b), odvodnik prenapona je premošten.

Kad je zvjezdište uzemljeno preko prigušnice, potrebno je da postoji mogućnost isklapanja prigušnice, odnosno rastavljanja prigušnice od nultačke transformatora. To omogućuje shema sa sl. 5.34a kad u transformatorskoj stanici sa dva transformatora postoji jedna prigušnica, a shema sa sl. 5.34b kad postoje dvije prigušnice. Prilikom izbora sheme spoja prigušnica treba uzeti u obzir i eventualni odvojeni pogon transformatora, jer to traži i odvojen pogon prigušnica. Radi toga se, kad u transformatorskoj stanici postoje tri i više transformatora, može postaviti zahtjev da se izvedu dvostruke sabirnice za priključak prigušnica.

E. Shema spoja zračnog voda i kabela

Osim sabirničkog rastavljača i sklopke na odvodu zračnog voda ili kabela, postavljaju se na izlazu iz rasklopnog postrojenja izlazni rastavljač i rastavljač za uzemljenje (sl. 5.35).

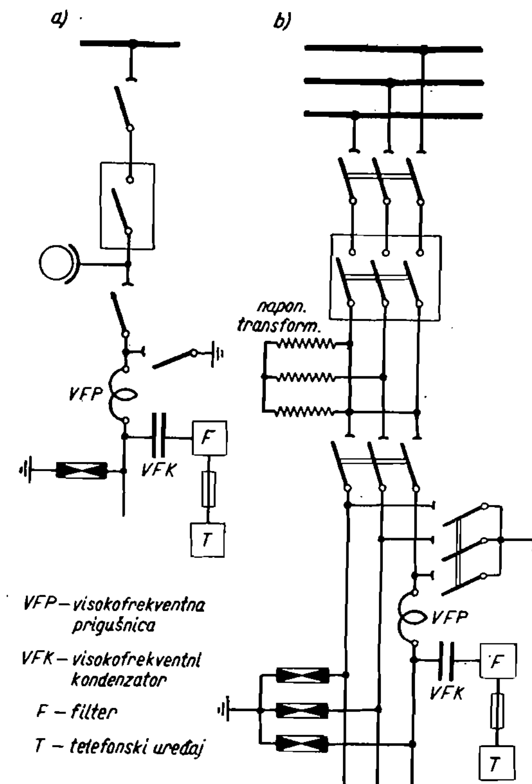


Slika 5.35. Položaj izlaznog rastavljača i rastavljača za uzemljenje u odvodu zračnog voda (ili kabela)

Izlazni rastavljač postavlja se da bi se omogućilo vidljivo rastavljanje rasklopnog postrojenja od zračnog voda ili kabela. Isklopljeni rastavljač omogućuje pregled i popravak sklopke bez opasnosti po osoblje od napona iz isključenog voda, bilo da taj napon dolazi iz elektrane na drugom kraju voda, bilo da je posljedica atmosferskih pražnjenja.

Rastavljač za uzemljenje, koji je obično izveden na istom postolju s izlaznim rastavljačem, služi za neposredno spajanje sa zemljom krajeva zračnog voda ili kabela. Zadaća je tog rastavljača da odvodi naboj koji je preostao nakon isklapanja voda ili kabela, odnosno da odvodi naboj koji bi se mogao pojaviti za vrijeme prekida pogona, kako bi se zaštitilo osoblje pri radovima. Izlazni rastavljač je obično mehanički povezan s rastavljačem za uzemljenje, da se onemogući istodobno uklapanje obaju rastavljača.

U svaki odvod zračnog voda postavlja se slog odvodnika prenapona (po jedan u svaku fazu) radi zaštite rasklopnog postrojenja od prenapona (sl. 5.36).



Slika 5.36. Shema spoja odvoda zračnog voda: (a) jednopolna, (b) tropolna shema

Slog naponskih transformatora, ukoliko je potreban u odvodu, postavlja se u svakom slučaju iza sklopke (gledano sa strane sabirnica), kako bi se mogao izmjeriti napon voda i prije nego što je sklopka uklopljena. Kad je zračni vod, ili kabel, spojen s mrežom u kojoj nema izvora energije, ne treba postavljati naponski transformator u odvod zračnog voda, jer ako vod nije spojen na sabirnice rasklopnog postrojenja sigurno je da na njemu nema napona. S druge pak strane, na početku voda vlada upravo napon sabirnica, kad je on spojen na njih, a napon je sabirnica poznat jer postoje naponski transformatori u mjernom polju. Nasuprot tome, ako je vod spojen s mrežom u kojoj postoje izvori energije, potrebno

je postaviti naponske transformatore, da bi se — prije priključenja sklopke — znalo da li je vod pod naponom. Naponski transformatori mogu, osim toga, poslužiti i za sinhronizaciju dvaju dijelova mreže.

Kao što je već spomenuto, naponske transformatore u odvodu priključuje se najčešće neposredno na vod, radi poteškoća pri izvedbi.

Vodovi ujedno služe za prijenos razgovora, signala, mjerenja i sl., što se prenosi pomoću visokofrekventne struje. Da bi bilo moguće u visokonaponski vod slati, odnosno preuzimati iz njega, te visokofrekventne struje, spaja se na vodič visokofrekventni kondenzator, koji za visokofrekventne struje predstavlja malen, a za struje industrijske frekvencije velik otpor. Da se spriječi širenje visokofrekventnih impulsa po cijeloj mreži, te da se smanji potrebna snaga visokofrekventnih signala, postavlja se na krajevima voda visokofrekventna prigušnica, koja mora biti dimenzionirana i s obzirom na struju voda u normalnom pogonu. Visokofrekventna prigušnica i visokofrekventni kondenzator postavljaju se samo u jednu fazu voda (sl. 5.36), a iza izlaznog rastavljača i rastavljača za uzemljenje (gledano sa strane sabirnica), da bi se osigurala mogućnost komunikacija i kad vod nije u pogonu.

U nekim slučajevima visokofrekventni signali dolaze jednim vodom, pa se dalje prenose drugim, prema drugom rasklopnom postrojenju, a da ne postoji mogućnost primanja signala u rasklopnom postrojenju u koji ulaze oba ta voda. To prenošenje signala treba da bude osigurano bez obzira na položaj rastavljača i sklopaka (sl. 5.36). Veza među vodovima ostvaruje se visokofrekventnim kondenzatorima i filterima za premoštenje.

5.4. SHEME SPOJA RASKLOPNIH POSTROJENJA

A. Rasklopna postrojenja s više odvoda

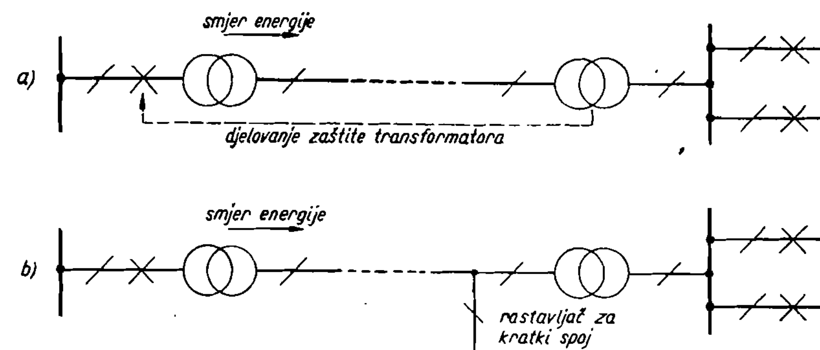
U rasklopnim postrojenjima s više odvoda normalno je najpovoljnije predvidjeti sabirnice. Sheme spoja svih dijelova u postrojenjima sa sabirnicama opisane su u poglavlju 5.3.

B. Rasklopna postrojenja s malo odvoda

U rasklopnim postrojenjima s malo odvoda, a naročito kad se ne računa s daljnjim proširenjem, povoljno je izvesti rasklopno postrojenje bez sabirnica.

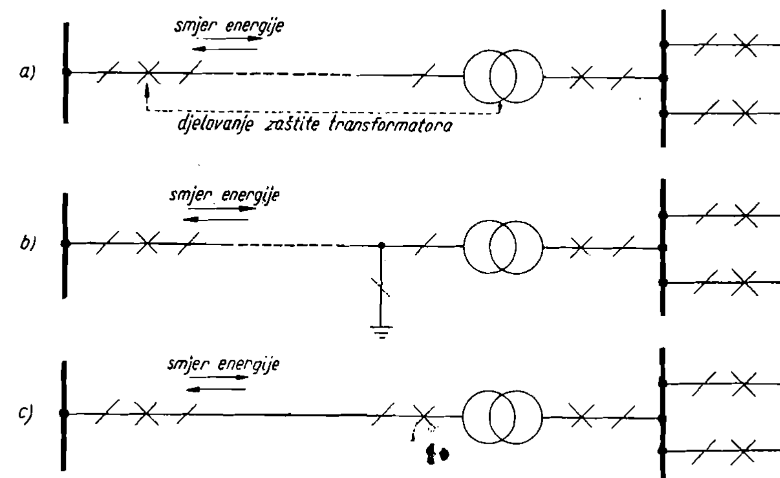
a) Transformator na kraju voda

Ako se radi o prijenosu jednim vodom i sa po jednim transformatorom na početku i na kraju voda, moguće je upotrijebiti shemu spoja u bloku transformator—vod—transformator, u kojoj je vod s transformatorima pogonska cjelina. Takva shema spoja (sl. 5.37) moguća je jer su svi dijelovi bloka spojeni u seriju, pa kvar na jednom dijelu dovodi do obustave pogona cijelog bloka. Radi toga se može smatrati da je dovoljna jedna sklopka na početku spomenutog bloka, te da svaki kvar koji se javlja



Slika 5.37. Blokspoj transformator—vod—transformator: (a) s djelovanjem zaštite transformatora na udaljenu sklopku, (b) s rastavljačem za kratki spoj

unutar bloka treba da djeluje na tu sklopku. To je lako ostvariti ako nastane kratak spoj, jer će struja kratkog spoja — ma gdje se on pojavio — protjecati kroz tu jedinu sklopku, odnosno kroz strujne transformatore postavljene neposredno uz sklopku. Poteškoća se pojavljuje ako djeluje neka preventivna zaštita transformatora (Buchholzova zaštita) na kraju voda, kad još nema struje kratkog spoja, pa je tada potrebno isključiti transformator da bi se spriječilo širenje kvara. Kvar se ne može registrirati na početku voda, pa je potrebno osigurati djelovanje te zaštite na sklopku na početku voda. Impuls za isklapanje sklopke mora se sigurno prenijeti s kraja na početak voda, što iziskuje dodatne investicije. Radi toga se u novije vrijeme traži rješenje postavljanjem rastavljača za kratak



Slika 5.38. Blokspoj vod—transformator: (a) s djelovanjem zaštite transformatora na udaljenu sklopku, (b) s rastavljačem za kratki spoj, (c) sa sklopkama na obje strane transformatora

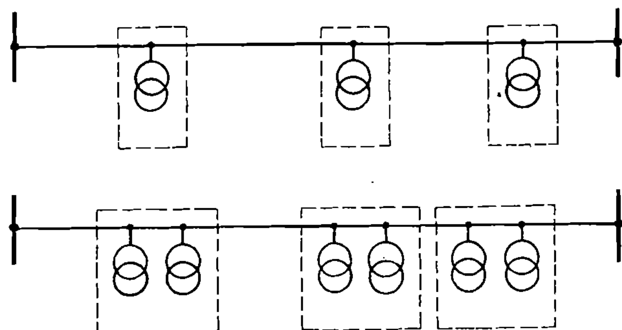
spoj na kraju voda (sl. 5.37b). Zaštita transformatora na kraju voda daje impuls za uklapanje tog rastavljača, posljedica čega je tropolni kratki spoj na kraju voda. Struja kratkog spoja djeluje na zaštitu na početku voda, što dovodi do isklapanja sklopke na njegovu početku.

Shema na sl. 5.37. vrijedi za slučaj ako se napaja samo s jedne strane. Kad bi postojala mogućnost napajanja sa dvije strane, potrebno bi bilo postaviti još jednu sklopku između sabirnica i transformatora na drugom kraju voda, s istodobnim povezivanjem zaštite transformatora na početku voda s tom sklopkom. Ako bismo se odlučili da postavimo rastavljač za kratki spoj, trebali bismo takav rastavljač postaviti i na početak voda, na koji bi djelovala zaštita transformatora na njegovu početku.

Slučaj prikazan na sl. 5.37. dosta je rijedak, jer se radi o izoliranom vodu višeg napona. Češće transformator postoji samo na kraju voda, dok je njegov početak priključen na sabirnice nekog većeg rasklopnog postrojenja. Na sl. 5.38. prikazana je shema spoja takve veze u tri varijante, kad postoji mogućnost napajanja s obje strane. U prvoj varijanti (sl. 5.38a) potrebno je osigurati djelovanje zaštite transformatora i na sklopku, koja se nalazi na početku voda. U drugoj (sl. 5.38b) je potreban samo jedan rastavljač za uzemljenje i pored mogućnosti dvostranog napajanja, dok su u trećoj varijanti (sl. 5.38c), koja se normalno izvodi, predviđene sklopke s obje strane transformatora.

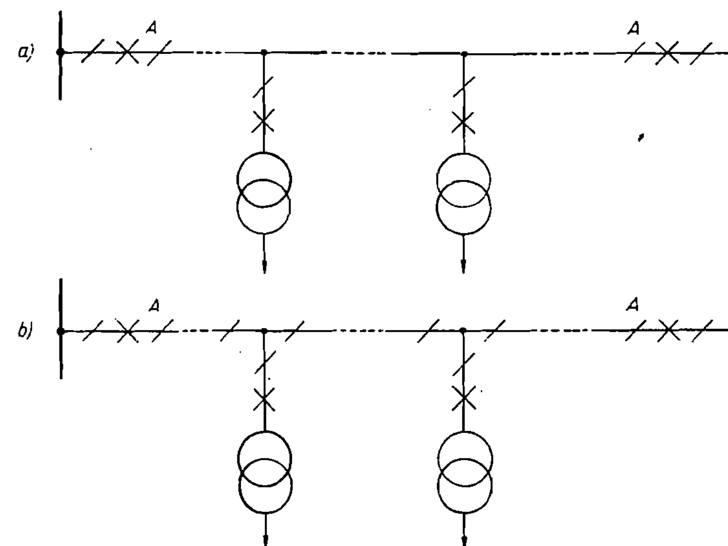
b) Transformatorska stanica u vodu

Vrlo često je potrebno priključiti transformator na vod za opskrbu manjih područja, koji se nalaze u njegovoj neposrednoj blizini (sl. 5.39). U malim mrežama to se događa na vodovima 10 kV, u srednjim i na naponu 35 kV, a u velikim još i na vodovima 110 kV.



Slika 5.39. Principne sheme transformatorskih stanica priključenih na vod

Najjednostavniji priključak transformatorske stanice prikazan je na sl. 5.40a. Transformator je zaštićen sklopkom (za više napone) ili učinskim rastavljačem i osiguračima (za niže napone i veće snage), odnosno običnim rastavljačem i osiguračima (za niže napone i manje snage). Glavna je mana takvog priključka ta što je nemoguće napajanje transformatorske stanice u slučaju kvara na bilo kojem dijelu voda. Poboljšanje se postiže



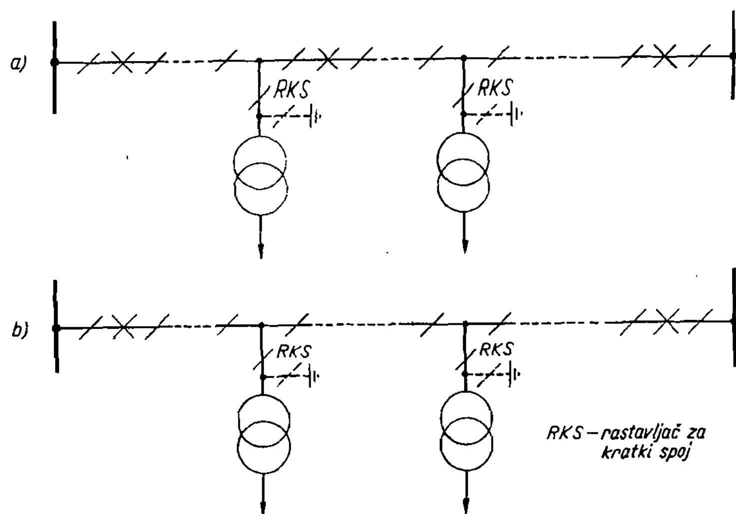
Slika 5.40. Priključak transformatora na vod: (a) bez rastavljača u vodu, (b) s rastavljačem u vodu

ugradnjom rastavljača u vod (sl. 5.40b), što omogućuje, nakon isklapanja sklopaka A na krajevima voda i izoliranja mjesta kvara, daljnje napajanje transformatorskih stanica.

Najskuplje rješenje sigurno jest ono koje predviđa po tri sklopke u svakom čvorištu (dvije u vodu, a treća u odvodu transformatora), pa se takvo postrojenje vrlo rijetko izvodi.

Za napone iznad 35 kV do uključivo 110 kV (odnosno do 132 kV, ako se taj napon upotrebljava u promatranoj mreži) nastoji se odabrati shema spoja koja treba što manje sklopaka. Primjeri takvih dviju shema spoja prikazani su na sl. 5.41. U shemi na sl. 5.41a odvodi s transformatorom postavljeni su među dvije sklopke. U slučaju kvara na vodu isklapaju se dvije susjedne sklopke, posljedica čega je prekid pogona samo jednog transformatora. U slučaju kvara na transformatoru, potrebno je da budu isklopljene također dvije susjedne sklopke, bilo prijenosom impulsa za upravljanje, bilo zatvaranjem rastavljača za kratki spoj (RKS na sl. 5.41). Nakon isklapanja sklopaka isključuje se — ručno ili automatski — rastavljač između transformatora i voda, poslije čega se sklopke mogu ponovo uklopiti. Za shemu spoja na sl. 5.41b potreban je minimalan broj sklopaka, ali svaki kvar izaziva prekid pogona svih transformatora priključenih na vod. Djelovanje zaštite transformatora analogno onome sa sheme na sl. 5.41a. To isto vrijedi i onda kad je upotrebljen rastavljač za kratki spoj.

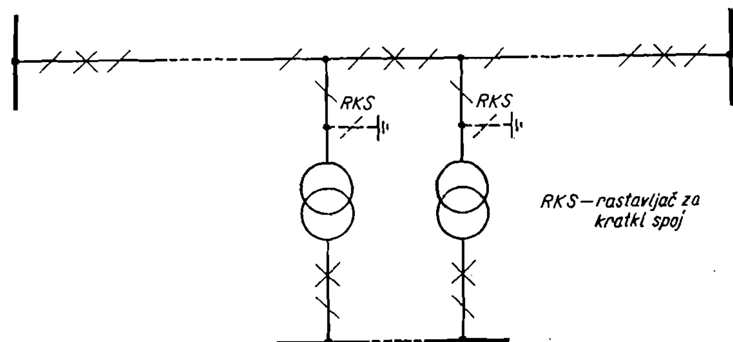
U stanicama sa dva transformatora moguće je za priključak na vod upotrijebiti niz shema različite elastičnosti i sigurnosti. Za niže napone može se priključak izvršiti prema shemama na sl. 5.40. Za napone iznad 35 kV do uključivo 110 kV (odnosno do 132 kV) moguće je priključak



Slika 5.41. Priključak transformatora na vod sa smanjenim brojem sklopaka

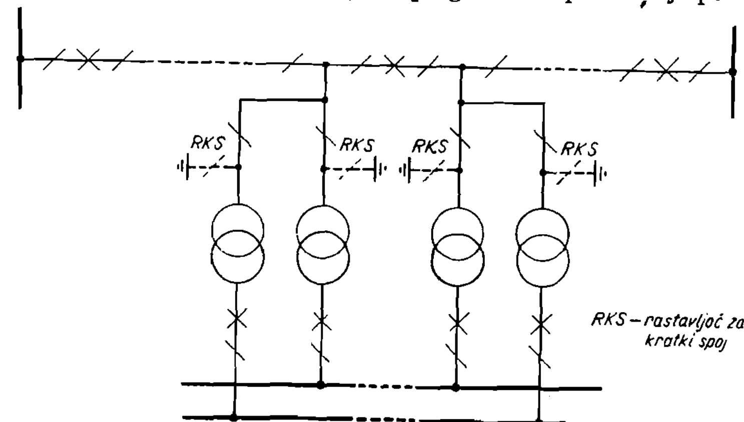
izvesti na više načina (sl. 5.42. do 5.47), u ovisnosti o važnosti potrošača priključenih na transformatore i u ovisnosti o vodu na koji su transformatori priključeni.

S obzirom na djelovanje zaštite transformatora moguća su dva rješenja: zaštita transformatora djeluje na dvije najbliže sklopke (potrebna veza između zaštitnih releja i sklopaka) ili zaštita transformatora djeluje na rastavljač za kratki spoj, pa sklopke isklapaju radi djelovanja struje kratkog spoja. Zbog toga je na shemama sa sl. 5.42. do 5.44. crtkano naznačen rastavljač za kratki spoj. Na ostalim shemama (sl. 5.45. do 5.47) sklopke se nalaze u neposrednoj blizini transformatora, pa za povezivanje zaštite transformatora i najbližih sklopaka ne nastaju poteškoće.



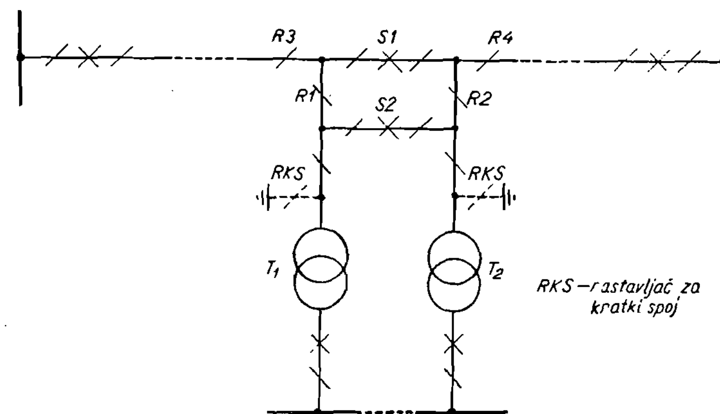
Slika 5.42. Shema s jednom sklopkom za priključak dvaju transformatora na vod

Na sl. 5.42. prikazana je shema spoja s jednom sklopkom za priključak dvaju transformatora na vod. Takva shema je povoljna kad se radi o vodu koji nije i neće biti značajan za prijenos energije i kad ne nastaju poteškoće radi prekida prijenosa. Shema se može upotrijebiti kad se ne očekuje proširenje stanice. Za vrijeme pregleda sklopke vod je podijeljen



Slika 5.43. Shema s jednom sklopkom za priključak četiri transformatora na vod—proširenje prema sl. 5.42.

na dva dijela, ali mogućnost napajanja oba transformatora ostaje. Tada, međutim, ne smiju transformatori biti na sekundarnoj strani međusobno spojeni, da bi se spriječio prijenos energije preko njih, a s tim i njihovo preopterećenje. Kvar na dijelu voda dovodi do prekida pogona i pridruženog transformatora i obrnuto. Vod se može brzo uključiti nakon isklapanja rastavljača na transformatorskom odvodu, a transformator

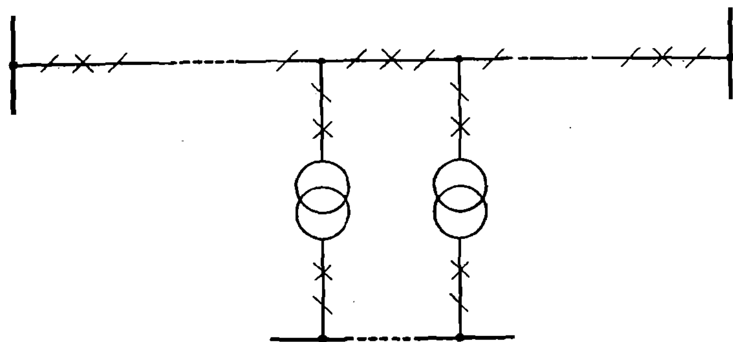


Slika 5.44. Shema s dvije sklopke za priključak dvaju transformatora na vod

isklapanjem rastavljača prema vodu. Potreban je kratak prekid pogona dijela voda za uključivanje i isključivanje pridruženog transformatora. Kvar između transformatorskih priključaka dovodi do potpune obustave pogona, sve dok se ne odijeli mjesto kvara od ostale mreže.

Na sl. 5.43. prikazana je mogućnost postavljanja daljnjih dvaju transformatora na priključak kao na shemi sa sl. 5.42. Kvar na jednom od zajedno priključenih transformatora dovodi do obustave pogona i pridruženog transformatora.

Upotrebom dviju sklopaka za priključak dvaju transformatora (sl. 5.44) povećava se kontinuitet pogona voda na koji su priključeni transformatori. Ta shema može se upotrijebiti kad ne nastaju poteškoće za pogon sistema radi prekida voda. Pregled i popravak sklopaka među transformatorskim odvodima može se izvršiti a da se ne prekida prijenos vodom. Osim toga transformatori se mogu uklapati i isklapati a da se ne prekine veza među dijelovima voda. Ako se npr. želi isključiti transformator T_1, najprije treba uključiti sklopku S_2 koja je u normalnom pogonu otvorena (naravno da treba uključiti i rastavljače s obje strane sklopke, koji su normalno također otvoreni). Tada su rastavljači R_1 i R_2

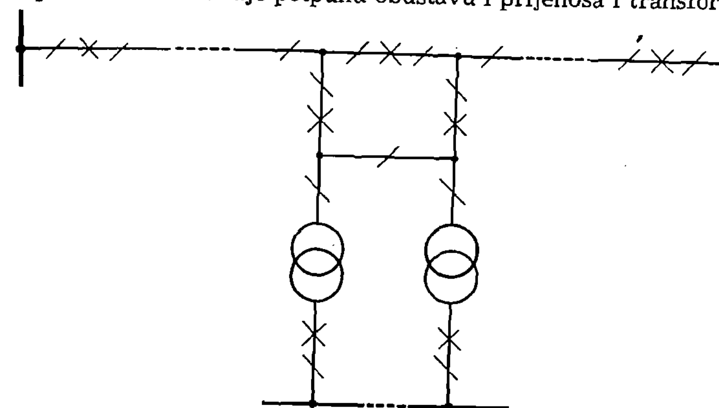


Slika 5.45. Shema s tri sklopke za priključak dvaju transformatora na vod

paralelno spojeni, pa se može bez opasnosti otvoriti rastavljač R_1, nakon čega je transformator T_1 priključen na vod samo preko sklopke S_2. Otvaranjem te sklopke transformator T_1 konačno je isključen. Da se uključi transformator T_1 treba postupiti obrnutim redom: uključiti sklopku S_2, zatim rastavljač R_1, te konačno isključiti sklopku S_2. Dogodi li se kvar na jednom od transformatora dolazi do isklapanja pridruženog dijela voda, koji se može uklopiti nakon iskapčanja rastavljača R_1, odnosno R_2. I u slučaju kvara na jednom dijelu voda prestaje napajanje pridruženog transformatora. Transformator se može ponovno uključiti nakon isklapanja rastavljača R_3, odnosno R_4. Kvar na sklopki S_1 izazvat će potpun prekid pogona, no koji će se moći nastaviti preko sklopke S_2.

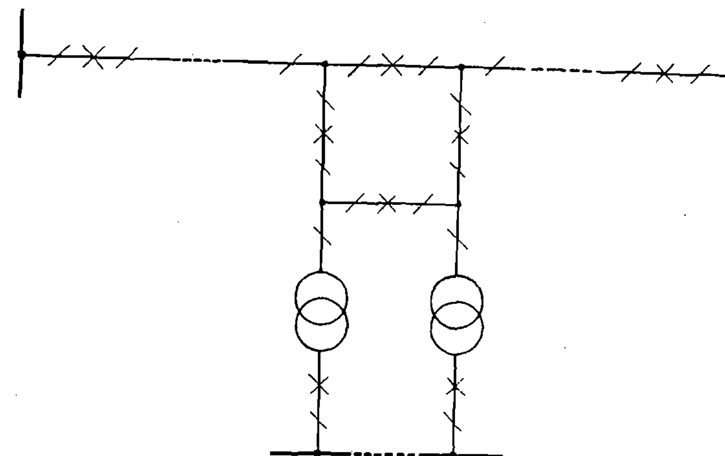
Shema sa tri sklopke (sl. 5.45) pogodna je kad se radi o vodu koji je važan za prijenos energije i čije je ponovo uklapanje vezano uz izvjesne poteškoće. Pregled i popravak sklopke među transformatorskim odvodima uzrokuje prekid u prijenosu, ali je i pored toga moguća dobava

energije transformatorima koji tada ne smiju biti međusobno spojeni na sekundarnoj strani, radi opasnosti od njihova preopterećenja. U slučaju kvara na transformatoru neće doći do prekida pogona na vodu. Kvar na sklopki u vodu uzrokuje potpunu obustavu i prijenosa i transformacije;



Slika 5.46. Shema s tri sklopke i s premoštenjem za priključak dvaju transformatora na vod

pogon transformatora može se uspostaviti nakon isklapanja rastavljača s obje strane sklopke, dok je za pogon cijelog voda potrebno izmijeniti sklopku.



Slika 5.47. Shema s četiri sklopke za priključak dvaju transformatora na vod

Poboljšanje pogonskih prilika postiže se postavljanjem premoštenja među transformatorskim odvodima (sl. 5.46). Tada nije potreban prekid prijenosa u slučaju pregleda i popravka sklopke među transformatorskim

odvodima, jer se prijenos može vršiti preko premoštenja. U takvoj situaciji kvar na transformatoru dovodi do prekida veze među dijelovima voda. Veza se može uspostaviti nakon isklapanja rastavljača neposredno pred transformatorom. Kvar na jednom dijelu voda izaziva prekid pogona pridruženog transformatora.

Najelastičnije rješenje jest shema sa četiri sklopke (sl. 5.47), jer u tom je slučaju moguće izvršiti popravak na bilo kojoj sklopki u rasklopnom postrojenju a da se ne prekida pogon.

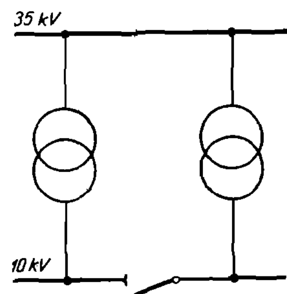
Koliki utjecaj ima shema spoja pokazuju slijedeći podaci o investicijama za sheme na sl. 5.42. i 5.44. do 5.47, te za slučajeve kad se upotrebljavaju jednostruke i dvostruke sabirnice (podaci se odnose na napon 132 kV — Lit. 87)

shema s jednom sklopkom (sl. 5.42)	100%
shema sa dvije sklopke (sl. 5.44)	125%
shema sa tri sklopke (sl. 5.45)	147%
shema sa tri sklopke i premoštenjem (sl. 5.46)	154%
shema sa četiri sklopke (sl. 5.47)	178%
shema s jednostrukim sabirnicama	208%
shema s dvostrukim sabirnicama	232%

Kao što se vidi, pretpostavljeno je da investicije za postrojenje prema shemi s jednom sklopkom iznose 100%. Naravno, u svim je slučajevima pretpostavljeno da u rasklopno postrojenje ulaze dva voda i da postoje dva transformatora iste snage.

5.5. SHEME SPOJA ZA SMANJENJE STRUJA KRATKOG SPOJA

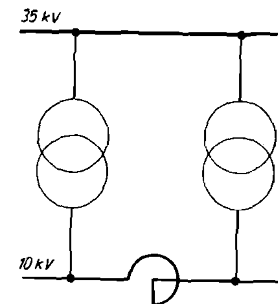
Struje kratkog spoja mogu se smanjiti izborom pogodne sheme spoja i bez posebnih prigušnica. Smanjenje struja kratkog spoja naročito je važno za rasklopna postrojenja nižeg napona, jer se tako mogu smanjiti investicije za njihovu izgradnju (upotreba sklopaka manje rasklopne moći i sl.).



Slika 5.48. Primjer odvojenog pogona transformatora na strani nižeg napona

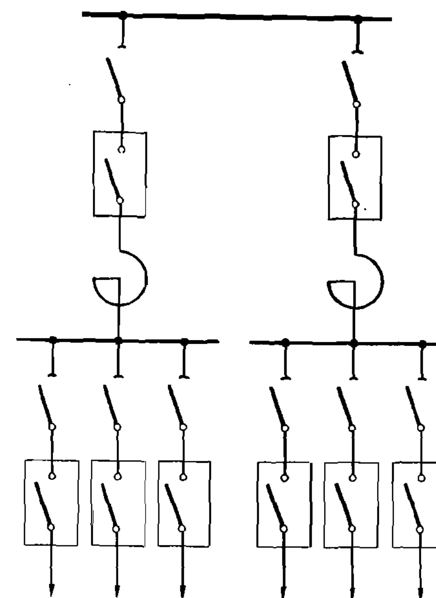
Smanjenje struja kratkog spoja najjednostavnije se može postići izbjegavanjem spajanja transformatora na strani nižeg napona (sl. 5.48). U tom slučaju mogu se pojaviti poteškoće u vezi sa sigurnošću opskrbe

potrošača, što je moguće barem djelomično riješiti uzdužnim rastavljačem u sabirnicama. Ako, naime, dođe do kvara na jednom od transformatora, drugi transformator može — zatvaranjem uzdužnog rastavljača — preuzeti dio opterećenja oštećenoga, uz smanjenje dobave vlastitim potrošačima.



Slika 5.49. Primjer postavljanja prigušnice u sabirnice nižeg napona među transformatore

Struje kratkog spoja mogu se smanjiti, pri shemi sa sl. 5.48, postavljanjem prigušnice u sabirnice među transformatorske priključnice na strani nižeg napona (sl. 5.49). Tada je, uz istodobno smanjenje struja kratkog spoja, omogućena opskrba potrošača na oba dijela sabirnica iz

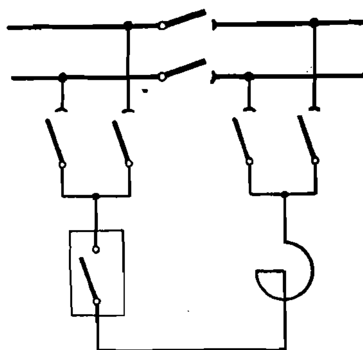


Slika 5.50. Primjer priključka prigušnice za smanjenje struje kratkog spoja u dijelu rasklopnog postrojenja

oba transformatora. S obzirom na prilike pri kratkom spoju povoljnije je što je napon kratkog spoja prigušnice veći i što je nazivna struja (prolazna nazivna snaga) prigušnice manja. S druge pak strane, smanjenjem nazivne struje prigušnice smanjuje se elastičnost veze između

dva dijela sabirnica. Treba međutim naglasiti, da se ni u jednom slučaju ne može ostvariti manja struja kratkog spoja, nego ona odvojenih sabirnica.

Općenito promatrano, nije naročito povoljno postavljati prigušnice među dovode, jer tada kroz prigušnicu protječe samo dio te struje. Zato se nastoji prigušnicu postaviti tako da kroz nju mora da prolazi ukupna struja kratkog spoja (sl. 5.50). Prednost je takvog postavljanja prigušnice da ona smanjuje struje kratkog spoja za grupu odvoda. Prema tome naročito je povoljno postaviti prigušnicu kad se radi o mnogo odvoda. Iz istih razloga postavlja se prigušnica u spojno polje (sl. 5.51), kako bi se smanjile struje kratkog spoja na odvodima priključenim na dio sabirnica.



Slika 5.51. Priključak prigušnice u spojnom polju

Znatnije smanjenje investicija radi smanjenja struja kratkog spoja postiže se kad je moguće radi toga upotrijebiti tip sklopke manje rasklopne moći (npr. mjesto sklopaka 600 MVA sklopke od 400 MVA). Ukoliko i pored postavljanja prigušnica nije moguće upotrijebiti manji tip sklopke, obično nema opravdanja upotreba prigušnica, jer se tada postižu samo manje uštede u rasklopnom postrojenju.

ŠESTO POGLAVLJE

MJERENJA U RASKLOPNIM POSTROJENJIMA

6.1. OPĆENITO O MJERENJIMA U RASKLOPNIM POSTROJENJIMA

Kad se govori o mjerenjima u rasklopnim postrojenjima, misli se na mjerenja koja se u većini slučajeva trajno vrše u pogonu, pomoću instrumenata koji su stalno priključeni (normalno na sekudarne stezaljke mjernih transformatora). Takva mjerenja nazivamo pogonskim mjerenjima, jer se pomoću njih vrši kontrola prilika u pogonu, dok mjerne instrumente nazivamo pogonskim mjernim instrumentima.

Pri pogonskim mjerenjima normalno se upotrebljavaju instrumenti klase tačnosti 1,5, dok se za rasklopna postrojnja bez stalne posade mogu upotrijebiti i instrumenti klase tačnosti 2,5. Spomenute klase tačnosti vrijede za sve mjerne pogonske instrumente, osim za brojila prema kojima se vrši obračun energije, kad se zahtijeva klasa tačnosti 0,5.

Pogonski instrumenti koji pokazuju vrijednosti mjerenih veličina mogu biti pokazni i registracioni. Na pokaznim instrumentima mogu se očitati vrijednosti samo u trenutku očitavanja, dok registracioni instrumenti, pored pokazivanja vrijednosti u trenutku očitavanja, još i registriraju izmjerene veličine. Osim takvih pogonskih instrumenata, upotrebljavaju se integracioni instrumenti (brojila) koji registriraju količinu energije.

Budući da su mjerni instrumenti priključeni na sekundarne strane mjernih transformatora, nazivne struje instrumenata iznose 5, odnosno 1 A, dok je nazivni napon 100 V.

6.2. PRIKLJUČAK MJERNIH INSTRUMENATA

A. Ampermetri

U odvodu se mjeri struja ili u jednoj ili u sve tri faze. U većini visokonaponskih odvoda dovoljno je mjeriti struje samo u jednoj fazi (sl. 4.145a), jer se pretpostavlja da je opterećenje simetrično i jer se kontrola simetričnosti opterećenja vrši na generatorskim odvodima. gdje se jačina struje mjeri u sve tri faze (sl. 4.145c). U nekim slučajevima je poželjno da se jačina struje može očitati na dva mjesta u rasklopnom

postrojenju (na ćeliji i komandnoj ploči), pa se tada na isti strujni transformator priključuju dva ampermetra u seriju.

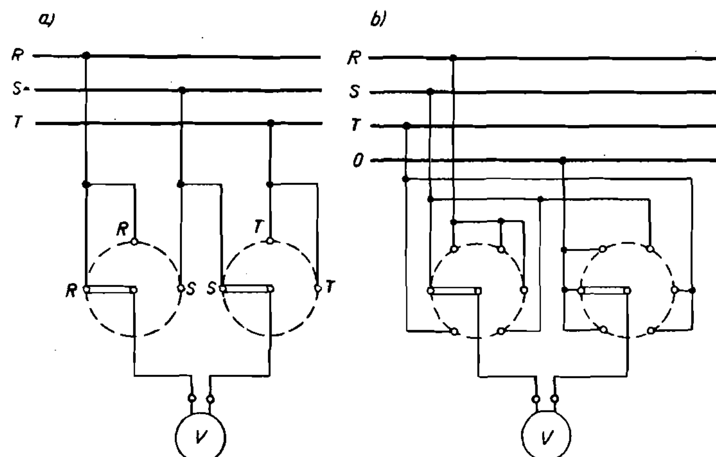
Jedna od sekundarnih stezaljki strujnog transformatora treba da bude uzemljena, da bi se otklonila opasnost za osoblje u slučaju proboja između primarnog i sekundarnog namota. Obično se na svim strujnim transformatorima uzemljuje stezaljka na strani sabirnica.

B. Voltmetri

Voltmetre priključujemo na sekundarne strane naponskih transformatora, koji su priključeni na sabirnice ili na odvode.

Pri mjerenju triju linijskih napona, odnosno triju faznih napona, nije normalno potrebno predvidjeti više od jednog voltmetra, jer se njegovo preklapanje na bilo koji od napona može provesti jednostavnom preklopkom. Nasuprot tome, preklopka se ne upotrebljava za mjerenje struja u više faza jednim ampermetrom, jer je tada potrebno prespojiti ne samo ampermetar na drugi strujni transformator, već i prethodno kratko spojiti strujni transformator na koji je bio priključen ampermetar.

Na sl. 6.1a prikazana je shema spoja voltmetra s preklopkom za mjemjerenje samo linijskih napona, a na sl. 6.1b voltmetar s preklopkom za mjerenje linijskih i faznih napona.



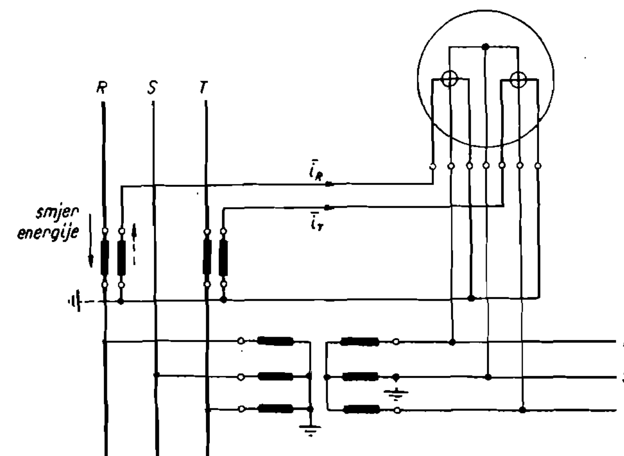
Slika 6.1. Shema spoja priključka voltmetra s preklopkom

Radi zaštite osoblja u rasklopnom postrojenju, potrebno je uzemljiti sekundarnu stranu naponskih transformatora. Obično se uzemljuje jedna od sekundarnih stezaljki. Treba, međutim, voditi računa o tome da se u istom rasklopnom postrojenju uzemlji stezaljka koja odgovara istoj fazi. To je naročito važno ako je u rasklopnom postrojenju predviđena sinhronizacija.

C. Mjerenje snage

a) Djelatna snaga

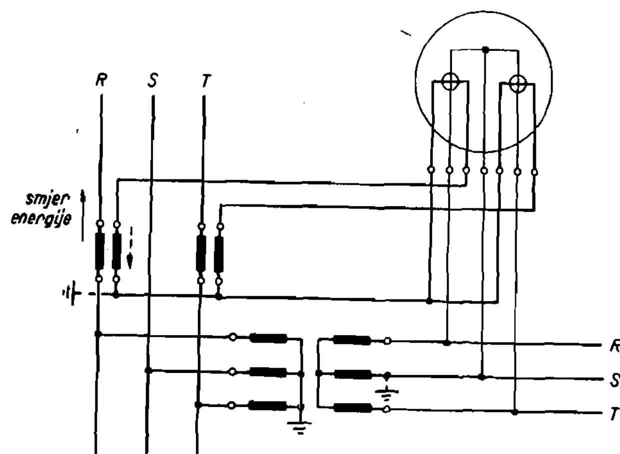
U visokonaponskim mrežama normalno se za mjerenje snage upotrebljava vatmetar sa dva mjerna sistema, koji tačno pokazuje u trofaznom sistemu s izoliranom nul-tačkom. Ako je međutim nul-tačka uzemljena bilo neposredno bilo preko prigušnice, pokazivanje vatmetra nije tačno pri jednopolnom ili dvopolnom kratkom spoju s istodobnim spojem sa zemljom, odnosno pri zemnom spoju, jer se tada struja zatvara i kroz



Slika 6.2. Shema spoja priključka vatmetra s dva mjerna sistema

zemlju kao kroz četvrti vodič. Suma struja kroz tri faze nije tada jednaka nuli, što je uvjet da bi rad vatmetra sa dva mjerna sistema bio ispravan. U mrežama s neposredno uzemljenom nul-tačkom spoj sa zemljom je kratak spoj, koji treba isključiti u roku od najviše nekoliko sekunda, pa greška pokazivanja praktički ne utječe na mjerenje. Nasuprot tome, zemni spoj u mreži koja je uzemljena preko prigušnice može trajati i dulje, pa je za to vrijeme pokazivanje vatmetra pogrešno. To nas obično u pogonu ne smeta, jer se prema vatmetru normalno ne vrši obračun.

Na sl. 6.2. prikazana je shema spoja priključka vatmetra sa dva mjerna sistema. Vatmetar je priključen na sekundarne strane strujnih i naponskih transformatora. Ako se radi o odvodu u kojemu se mijenja smjer energije, potrebno je odabrati vatmetar s nulom u sredini skale. Prilikom spajanja vatmetra treba voditi računa o fazama u kojima se nalaze strujni transformatori, kako bi se na mjerne sisteme priključili naponi koji odgovaraju baš tim fazama. Ako za mjerenje uzimamo npr. struje u fazama R i T, na mjerni sistem kroz čiji strujni svitak protječe struja

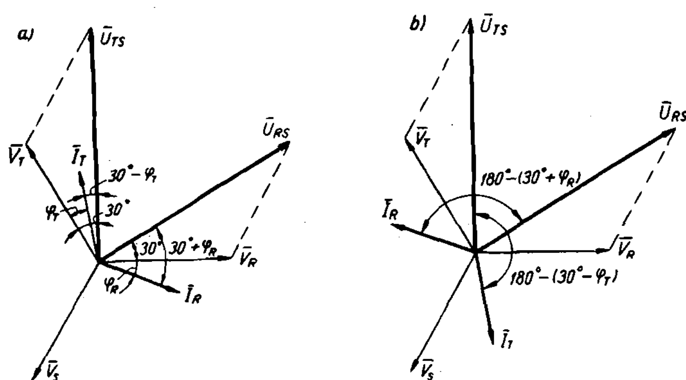


Slika 6.3. Shema spoja priključka vatmetra s dva mjerna sistema, ali s obrnutim smjerom energije prema sl. 6.2.

aze R treba narinuti napon između faza R i S (struja faze S ne dovodi e u vatmetar!), dok na mjerni sistem kroz čiji strujni svitak protječe truja faze T treba narinuti napon između faze T i S. Na osovinu atmetra djeluje moment koji je proporcionalan snazi (sl. 6.4a)

$$P = I_R\, U_{RS} \cos (30^0 + \varphi_R) + I_T\, U_{TS} \cos (30^0 - \varphi_T) \qquad \ldots (6.1)$$

Jednostavnu kontrolu možemo provesti ako pretpostavimo da su struje, aponi i fazni pomaci u pojedinim fazama međusobno jednaki. Tada obivamo



Slika 6.4. Struje i naponi u svicima vatmetra s dva mjerna sistema: (b) suprotan smjer energije u odnosu na (a)

$$\begin{aligned} P &= IU [\cos (30^0 + \varphi) + \cos (30^0 - \varphi)] = \\ &= IU (\cos 30^0 \cos \varphi - \sin 30^0 \sin \varphi + \cos 30^0 \cos \varphi + \\ &+ \sin 30^0 \sin \varphi) = \sqrt{3}\, IU \cos \varphi \end{aligned} \qquad \ldots (6.1a)$$

što upravo daje djelatnu snagu u trofaznom sistemu.

Ako za spoj i smjer energije na sl. 6.2. vatmetar ima ispravan otklon, promjena smjera energije uz isti spoj dovest će do suprotnog otklona kazaljke. Tada su vektori struja zaokrenuti za 180⁰ (sl. 6.4b), pa je

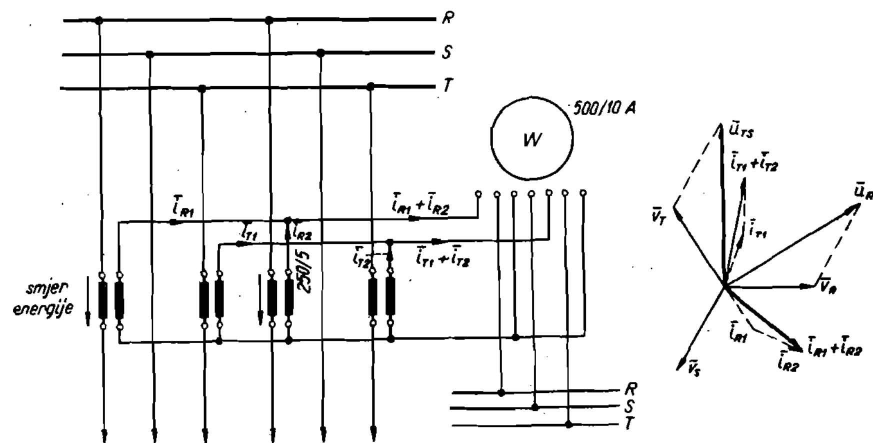
$$\begin{aligned} P' &= I_R\, U_{RS} \cos [180^0 - (30^0 + \varphi_R)] + I_T\, U_{TS} \cos [180^0 - (30^0 - \varphi_T)] = \\ &= -[I_R\, U_{RS} \cos (30^0 + \varphi) + I_T\, U_{TS} \cos (30^0 - \varphi_T)] \end{aligned} \qquad \ldots (6.2)$$

Da se postigne ispravan otklon instrumenta dovoljno je izmijeniti priključke za strujne grane vatmetra (sl. 6.3), pa on reagira kao da se nije promijenio smjer energije.

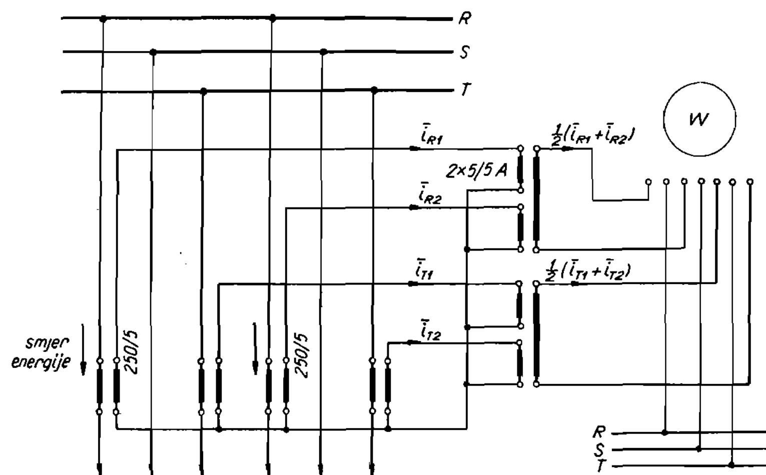
U nekim slučajevima korisno je poznavati zbroj opterećenja u više odvoda, postavljanjem jednog zajedničkog vatmetra.

Ako strujni transformatori u odvodima imaju iste prijenosne omjere (250/5 A na sl. 6.5), dovoljno je paralelno spojiti sekundarne namote strujnih transformatora i sumu struja dovesti u vatmetar. No tada se ne može upotrijebiti vatmetar nazivne struje 5 A. Nazivna struja vatmetra treba da iznosi 10 A (2 × 5 A) kad se radi o dva odvoda, odnosno 5 n A, ako je n broj odvoda. Skala vatmetra treba da bude takva kao da je prijenosni omjer strujnog transformatora $nI_{n1}/5n$ A, gdje je I_{n1} primarna nazivna struja jednog strujnog transformatora (500/10 A za slučaj prikazan na sl. 6.5).

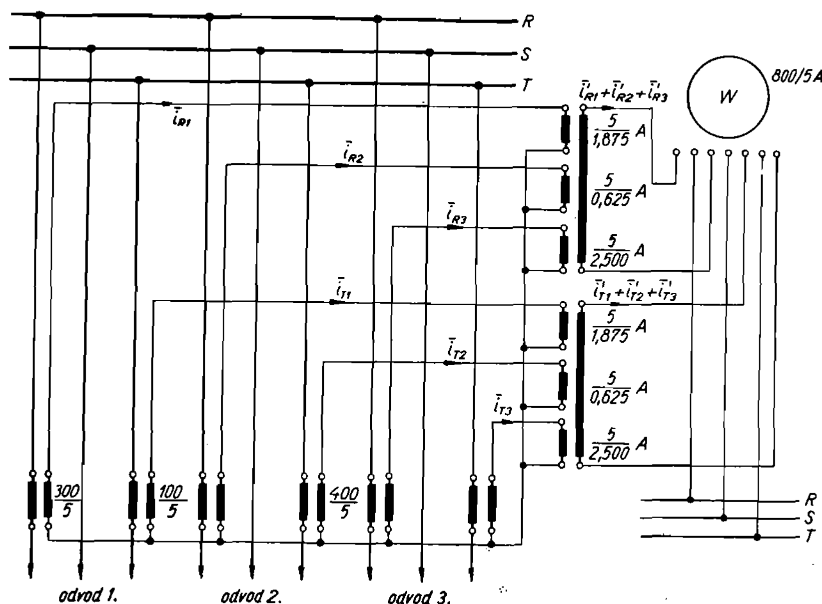
Upotreba vatmetra nazivne struje veće od 5 A može se izbjeći postavljanjem dvaju međutransformatora (sl. 6.6) na koje su priključene sekundarne strane strujnih transformatora na odvodima. Međutransformator ima toliko primarnih namota koliko ima odvoda, dok je prijenosni omjer



Slika 6.5. Zbrajanje opterećenja dvaju odvoda sa strujnim tranformatorima istih prijenosnih omjera



Slika 6.6. Zbrajanje opterećenja dvaju odvoda sa strujnim transformatorima istih prijenosnih omjera pomoću međutransformatora



Slika 6.7. Zbrajanje opterećenja triju odvoda sa strujnim transformatorima različitih prijenosnih omjera pomoću zajedničkog međutransformatora

5 n/5 A. Ako naime u jednom od primarnih namota teče struja **i** (u ostalim primarnim namotima nema struje!), u sekundarnom namotu teče $i' = i/n$, odnosno $i' = i/2$ u slučaju sa sl. 6.6. Na skalu vatmetra unijete su vrijednosti kao da je vatmetar priključen na strujne transformatore prijenosnog omjera $n\,I_{n1}/5$ A.

Pomoću međutransformatora može se mjeriti i zbroj opterećenja odvoda na koje su postavljeni strujni transformatori različitih prijenosnih omjera. Shema spoja za mjerenje zbroja opterećenja triju odvoda prikazana je na sl. 6.7. Ako sa $I_{n1}, I_{n2} \dots I_{nk}$ označimo primarne nazivne struje strujnih transformatora u odvodima, prijenosni omjer prvog primarnog namota prema sekundarnom namotu međutransformatora određujemo iz relacije

$$\frac{\Sigma I_{nk}}{I_{n1}} = \frac{5}{5\,\dfrac{I_{n1}}{\Sigma I_{nk}}} \qquad \dots (6.3)$$

U brojniku naime mora biti 5 A, jer je svaki primarni namot međutransformatora priključen na sekundarni namot strujnog transformatora u odvodu, a u nazivniku desne strane relacije (6.3) imamo struju međutransformatora, koja teče u sekundarnom namotu kad se u primarnom namotu pojavi nazivna struja. Strujni transformatori na odvodima sa sl. 6.7. imaju prijenosne omjere 300/5, 100/5 i 400/5 A, pa vatmetar treba da ima skalu kao da je priključen na strujne transformatore 800/5 A (ΣI_{nk}/5 A). Prijenosni omjeri primarnih namota prema sekundarnom namotu međutransformatora jesu prema (6.3): 5/1,875 A, 5/0,625 A i 5/2,500 A. Prema tome, kad u primarnim namotima teku struje od po 5 A, u sekundarnom namotu teći će također 5 A, ako su primarne struje u fazi. Relacija (6.3) vrijedi kad su nazivne sekundarne struje strujnih transformatora jednake nazivnoj struji vatmetra. Ako taj uvjet nije ispunjen, prijenosne omjere međutransformatora odredit ćemo iz omjera

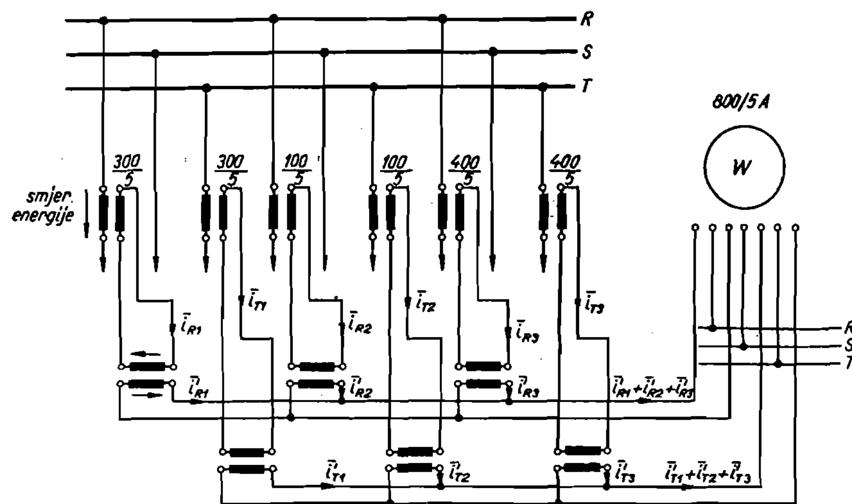
$$\frac{\Sigma I_{nk}}{i_{wn}} : \frac{I_{n1}}{i_{n1}} = \frac{i_{n1}}{i_{wn}\,\dfrac{I_{n1}}{\Sigma I_{nk}}} \qquad \dots (6.4)$$

gdje su i_{wn} nazivna struja vatmetra, a i_{n1} nazivna sekundarna struja strujnih transformatora. Nazivnik desne strane relacije (6.4) i sada je nazivna sekundarna struja međutransformatora.

Ako je za slučaj sa sl. 6.7. i_{wn} = 1 A, prijenosni omjeri međutransformatora bit će: 5/0,375 A, 5/0,125 A i 5/0,500 A. Tada suma sekundarnih struja iznosi upravo 1 A.

Isti se rezultat postiže kad se mjesto zajedničkog međutransformatora postave pojedinačni na svaki strujni transformator na odvodima (sl. 6.8). Prijenosni omjeri pojedinačnih mjernih transformatora određuju se na isti način kao i prijenosni omjeri pojedinih primarnih namota prema sekundarnom namotu međutransformatora.

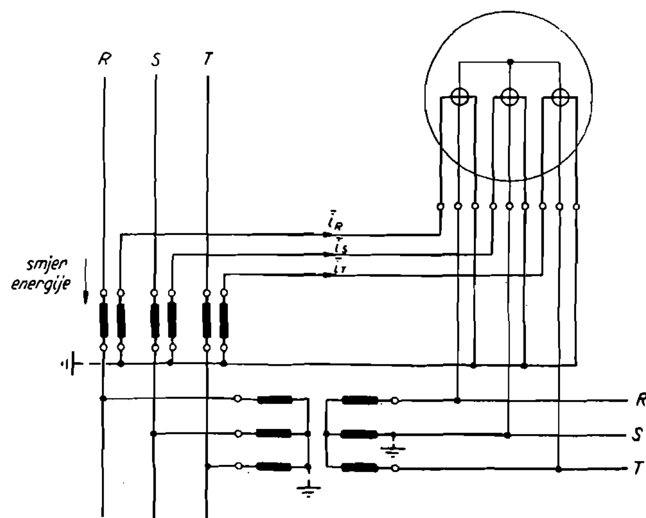
Na sl. 6.9. prikazana je shema spoja vatmetra sa tri mjerna sistema.



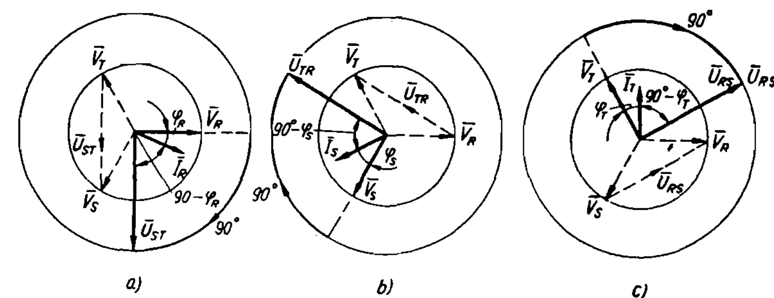
Slika 6.8. Zbrajanje opterećenja tri odvoda sa strujnim transformatorima različitih prijenosnih omjera pomoću pojedinačnih međutransformatora

b) Jalova snaga

Za mjerenje jalove snage upotrebljava se instrument koji je izveden isto kao i vatmetar. Takav instrument zove se varmetar. Da bi pokazivao opterećenje jalovom snagom, mjesto opterećenje djelatnom snagom, po-



Slika 6.9. Shema spoja priključka vatmetra s tri mjerna sistema



Slika 6.10. Prikaz mogućnosti priključka naponskih svitaka varmetra s tri mjerna sistema (induktivno jalovo opterećenje)

trebno je da se naponski svitak priključi na napon koji je za 90° zakrenut prema naponu potrebnom za mjerenje opterećenja djelatnom snagom.

Prikažimo najprije vatmetar sa tri mjerna sistema. Pri mjerenju djelatne snage kroz svaki od mjernih sistema protječe struja jedne faze, dok je na naponski svitak narinut fazni napon odgovarajuće faze. Zakretni moment vatmetar proporcionalan je djelatnoj snazi trofaznog sistema

$$P = I_R V_R \cos \varphi_R + I_S V_S \cos \varphi_S + I_T V_T \cos \varphi_T \qquad \ldots (6.5)$$

Da bi se postigao zakretni moment proporcionalan jalovoj snazi, potrebno je na svaki naponski svitak narinuti napon koji je za 90° zakrenut prema svakom pojedinom iz relacije (6.5). Potražimo koji su to naponi. Ako kroz strujni svitak teče struja faze R, na naponski svitak treba narinuti fazni napon $\mathbf{V}_R$ (sl. 6.10a) kad se radi o vatmetru. Zakrenimo napon $\mathbf{V}_R$ za 90° pa će se zakrenuti vektor poklopiti sa smjerom linijskog napona $\mathbf{U}_{ST}$. Ako dakle želimo mjeriti jalovu snagu, trebamo na naponski svitak narinuti linijski napon $\mathbf{U}_{ST}$. Analogno za ostala dva sistema dobivamo da na njihove naponske svitke treba narinuti linijski napon $\mathbf{U}_{TR}$, odnosno $\mathbf{U}_{RS}$. Prema tome bi jalova snaga koju bi pokazivao varmetar iznosila

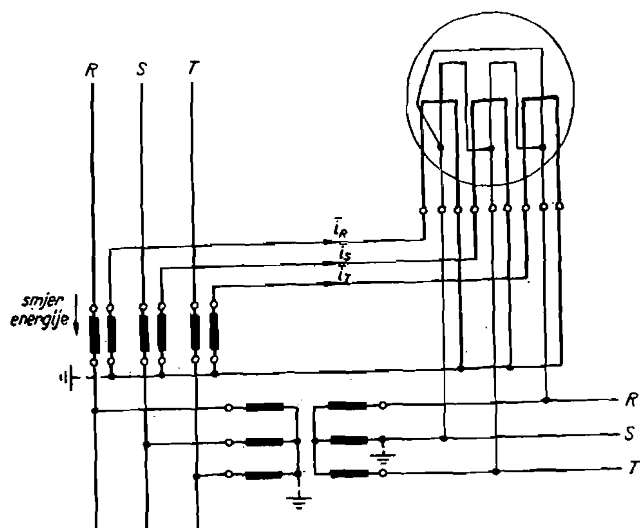
$$Q' = I_R U_{ST} \cos (90^0 - \varphi_R) + I_S U_{TR} \cos (90^0 - \varphi_S) + $$
$$+ I_T U_{RS} \cos (90^0 - \varphi_T) \qquad \ldots (6.6)$$

no budući da su linijski naponi za $\sqrt{3}$ veći od faznih, varmetar će pokazivati za toliko veću snagu, pa njegovo pokazivanje treba podijeliti sa $\sqrt{3}$ da bi se dobila prava jalova snaga. Dakle

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (I_R U_{ST} \sin \varphi_R + I_S U_{TR} \sin \varphi_S + I_T U_{RS} \sin \varphi_T) \qquad \ldots (6.7)$$

Smanjeno pokazivanje varmetra normalno se postiže postavljanjem predotpora u naponsku granu.

Shema spoja varmetra sa tri mjerna sistema prikazana je na sl. 6.11.



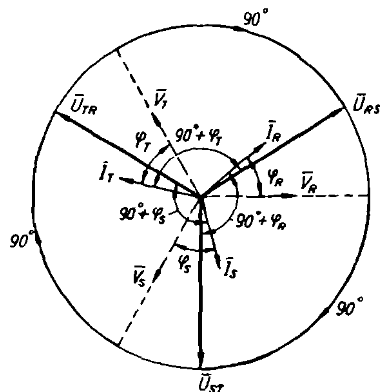
Slika 6.11. Shema spoja varmetra s tri mjerna sistema

Vektorski dijagrami na sl. 6.10, te relacije (6.6) i (6.7), vrijede za induktivno jalovo opterećenje. U slučaju kapacitivnog opterećenja (sl. 6.12) relacije (6.6) i (6.7) glase

$$Q' = I_R U_{ST} \cos(90^0 + \varphi_R) + I_S U_{TR} \cos(90^0 + \varphi_S) + I_T U_{RS} \cos(90^0 + \varphi_T) \qquad \ldots (6.8)$$

pa je

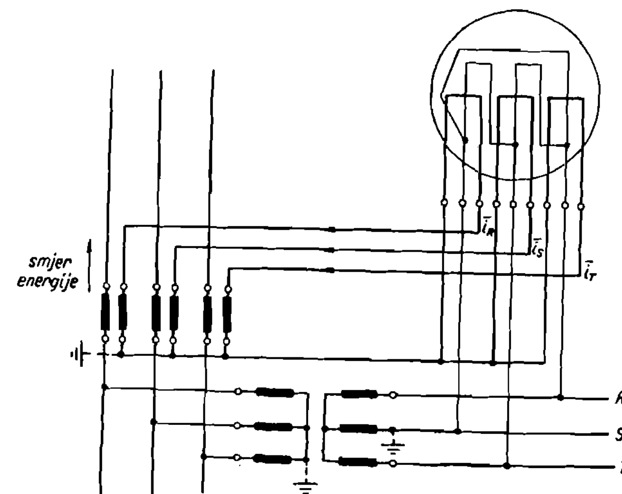
$$Q = -\frac{1}{\sqrt{3}}(I_R U_{ST} \sin\varphi_R + I_S U_{TR} \sin\varphi_S + I_T U_{RS} \sin\varphi_T) \qquad \ldots (6.9)$$



Slika 6.12. Prikaz mogućnosti priključka naponskih svitaka varmetra s tri mjerna sistema (kapacitivno jalovo opterećenje)

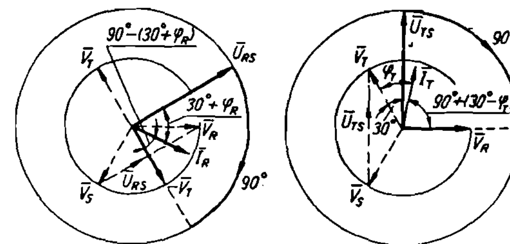
Pri kapacitivnom opterećenju kazaljka varmetra otklonit će se dakle na protivnu stranu od one pri induktivnom opterećenju.

Pri izmijenjenom smjeru energije dovoljno je zamijeniti stezaljke strujnih grana (sl. 6.13) na varmetru, da se dobiju isti otkloni kao pri neizmijenjenom smjeru.



Slika 6.13. Shema spoja varmetra s tri mjerna sistema s *obrnutim smjerom energije prema sl. 6.11.*

U najviše slučajeva upotrebljava se varmetar sa dva mjerna sistema, zbog istih razloga koji vrijede za upotrebu vatmetra sa dva mjerna sistema. I tada je, međutim, potrebno pronaći napone koji su za 90⁰ zakrenuti prema naponima narinutim na naponske svitke vatmetra (sl. 6.14). Tako na naponski svitak mjernog sistema, kroz čiji strujni svitak protječe struja faze R, treba narinuti fazni napon V_T, ali s izmijenjenim priključnicama ($-V_T$), dok na drugi naponski svitak treba nari-



Slika 6.14. Prikaz mogućnosti priključka naponskih svitaka varmetra s dva mjerna sistema (induktivno jalovo opterećenje)

nuti napon V_R, ako kroz strujni svitak protječe struja faze T. Izmjereno jalovo opterećenje iznosi tada

$$Q' = I_R V_T \cos[90^0 - (30^0 + \varphi_R)] + I_T V_R \cos[90^0 + (30^0 - \varphi_T)] \quad \ldots (6.10)$$

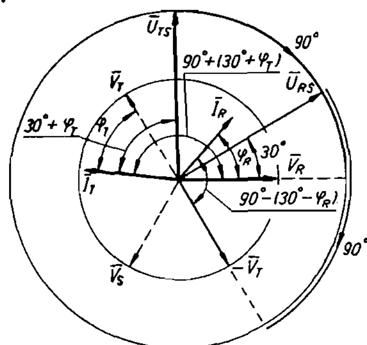
a budući da su fazni naponi za $\sqrt{3}$ puta manji od linijskih, treba (6.10) množiti sa $\sqrt{3}$ da se dobije prava jalova snaga pa je

$$Q = \sqrt{3}\,[I_R V_T \sin(30^0 + \varphi_R) - I_T V_R \sin(30^0 - \varphi_T)] \quad \ldots (6.11)$$

I sada se može jednostavno provesti kontrola postavljanjem da je $I_R = I_T$, $V_R = V_T$ i $\varphi_R = \varphi_T$, pa je

$$Q = \sqrt{3}\, I\, V\, [\sin(30^0 + \varphi) - \sin(30^0 - \varphi)] =$$
$$= \sqrt{3}\, I\, V\, (\sin 30^0 \cos\varphi + \cos 30^0 \sin\varphi - \sin 30^0 \cos\varphi +$$
$$+ \cos 30^0 \sin\varphi) = 3\, I\, V \sin\varphi = \sqrt{3}\, I\, U \sin\varphi \quad \ldots (6.11a)$$

Za kapacitivno opterećenje imamo odnose prikazane na sl. 6.15. Dolazimo, kao i za varmetar sa tri mjerna sistema, do suprotnog otklona kazaljke.



Slika 6.15. Prikaz mogućnosti priključka naponskih svitaka varmetra s dva mjerna sistema (kapacitivno jalovo opterećenje)

Za kapacitivno opterećenje naime dobivamo

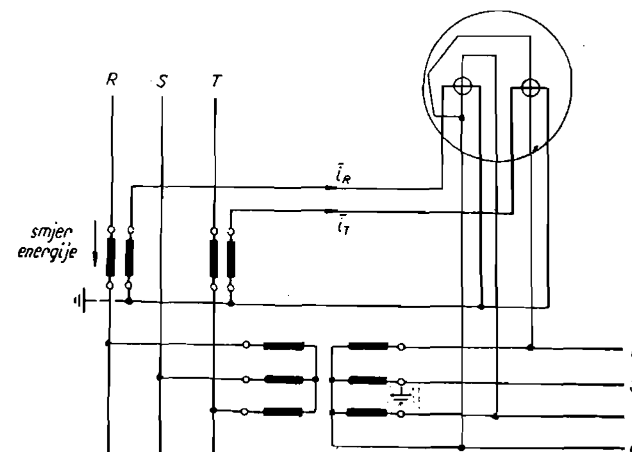
$$Q' = I_R V_T \cos[90^0 - (30^0 - \varphi_R)] + I_T V_R \cos[90^0 + (30^0 + \varphi_T)] \quad \ldots (6.12)$$

Množenjem sa $\sqrt{3}$ i nakon pretvaranja cosinusâ u sinuse, imamo

$$Q = \sqrt{3}\,[I_R V_T \sin(30^0 - \varphi_R) - I_T V_R \sin(30^0 + \varphi_T)] \quad \ldots (6.13)$$

Postavljanjem da je $I_R = I_T$, $V_R = V_T$ i $\varphi_R = \varphi_T$ dobivamo

$$Q = \sqrt{3}\, I\, V\, [(\sin 30^0 - \varphi) - \sin(30^0 + \varphi)] =$$
$$= \sqrt{3}\, I\, V\, (\sin 30^0 \cos\varphi - \cos 30^0 \sin\varphi - \sin 30^0 \cos\varphi -$$
$$- \cos 30^0 \sin\varphi) =$$
$$= -3\, I\, V \sin\varphi = -\sqrt{3}\, I\, U \sin\varphi \quad \ldots (6.13a)$$



Slika 6.16. Shema spoja varmetra s dva mjerna sistema

Shema spoja varmetra sa dva mjerna sistema prikazana je na sl. 6.16. Pri izmijenjenom smjeru energije imamo iste odnose kao i za varmetar sa tri mjerna sistema.

D. Mjerenje faktora snage

Za kontrolu u pogonu povoljnije je poznavati djelatno i jalovo opterećenje nego djelatno opterećenje i faktor snage ($\cos\varphi$). U oba slučaja, naime, mogu se odrediti prividna snaga i faktor snage, odnosno prividna i jalova snaga. U slučaju mjerenja djelatne i jalove snage mjere se veličine koje su međusobno neovisne, jer se mogu i proizvoditi praktički neovisno jedna od druge.

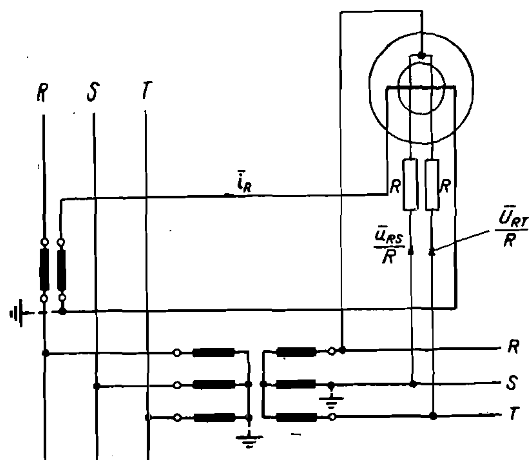
U starijim postrojenjima — pa i nekim novijim — naći će se ipak $\cos\varphi$-metar.

Strujni svitak (sl. 6.17) u elektrodinamskom sistemu proizvodi magnetsko polje u kojem se nalaze dva pomična naponska svitka, međusobno pomaknuta za 90°. Ako npr. kroz strujni svitak protječe struja faze R, naponske svitke treba priključiti na linijske napone između faze R i ostalih dviju faza. Zakretni moment između strujnog svitka i svitka priključenog između faza R i S jest

$$M_1 = c\, i_R \frac{U_{RS}}{R} \cos(30^0 + \varphi) \sin\alpha \quad \ldots (6.14)$$

gdje su c konstanta, a α kut među svicima. Na drugi naponski svitak, koji je mehanički spojen s prvim, a zakrenut prema prvom za 90°, djeluje zakretni moment

$$M = c\, i_R \frac{U_{RT}}{R} \cos(30^0 - \varphi) \sin(90^0 - \alpha) \quad \ldots (6.15)$$

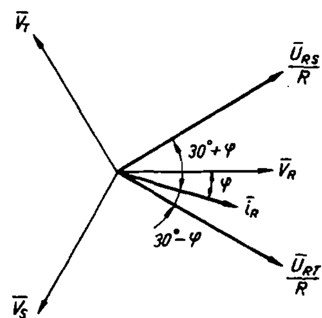


Slika 6.17. Shema spoja cos φ-metra

Sistem je u ravnoteži kad su oba zakretna momenta međusobno jednaka. Iz jednakosti momenata dolazimo do relacije

$$\frac{\cos(30^0 - \varphi)}{\cos(30^0 + \varphi)} = c_1 \operatorname{tg} \alpha \qquad \ldots (6.16)$$

Prema tome je otklon kazaljke (α) cos φ-metra funkcija faznog pomaka struje, pa ta činjenica omogućuje mjerenje faznog pomaka.



Slika 6.18. Struja u svicima cos φ-metra

E. Brojila

a) Brojila djelatne energije

Mjerni sistem brojila sastoji se od dva elektromagneta. Kroz svitak (strujni) jednog elektromagneta protječe struja proporcionalna struji opterećenja (strujni elektromagnet), a kroz drugi (naponski svitak) struja proporcionalna naponu (naponski elektromagnet). Elektromagneti stoje jedan nasuprot drugom, a između njih se nalazi vrtiva aluminijska ploča.

Magnetski tok strujnog elektromagneta Φ_s proporcionalan je struji I, a tok naponskog elektromagneta Φ_n naponu U. Oba toka induciraju u aluminijskoj ploči struje koje za tokom zaostaju za 90^0, pa na ploču djeluju dva momenta. Ukupni moment možemo prikazati relacijom

$$M = k\, \Phi_s \Phi_n \sin \psi \qquad \ldots (6.17)$$

gdje je ψ fazni pomak među tokovima Φ_s i Φ_n. Zanemarimo li gubitke u željezu i uz pretpostavku da naponski svitak nema djelatnog otpora (struja u naponskom svitku zaostaje 90^0 za naponom) tok Φ_s bit će u fazi sa strujom I, dok će tok Φ_n zaostajati 90^0 za naponom U (sl. 6.19a). Kut među tokovima iznosit će

$$\psi = 90^0 - \varphi \qquad \ldots (6.18)$$

gdje je φ fazni pomak između struje i napona. Prema tome će moment biti

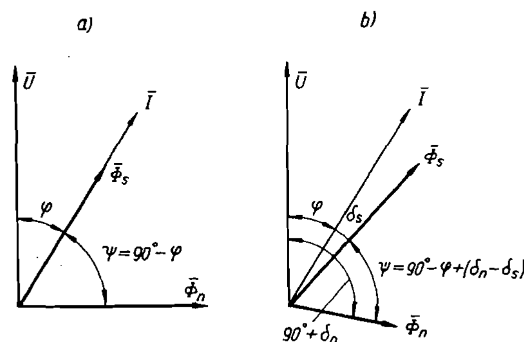
$$M = k\, \Phi_s \Phi_n \sin(90^0 - \varphi) = k\, \Phi_s \Phi_n \cos \varphi \qquad \ldots (6.19)$$

Budući da su tokovi proporcionalni struji I, odnosno naponu U, moment će biti proporcionalan djelatnoj snazi (P)

$$M = k_1\, IU \cos \varphi = k_1 P. \qquad \ldots (6.20)$$

Ako uzmemo u obzir gubitke u željezu i one radi struje u aluminijskoj ploči, tok Φ_s proizveden od struje I zaostaje za strujom za kut δ_s (sl. 6.19b). Radi djelatnog otpora naponskog svitka imat će struja kroz taj svitak fazni pomak manji od 90^0, pa će radi pomaka toka Φ_s i pomaka toka Φ_n u suprotnom smjeru kut među tokovima biti manji od $90^0 - \varphi$, zbog čega moment neće biti proporcionalan djelatnoj snazi. Da se to postigne, postavlja se među stopalima naponskog elektromagneta magnetski shunt koji premošćuje stopala, pa se veći dio toka proizveden naponskim svitkom zatvara preko premoštenja, a manji prolazi kroz aluminijsku ploču. Samo taj manji dio toka ulazi u relaciju (6.17). On je na sl. 6.19b označen sa Φ_n, i zaostaje za naponom U za kut $90^0 + \delta_n$. Kut je među tokovima, dakle

$$\psi = 90^0 - \varphi + (\delta_n - \delta_s) \qquad \ldots (6.21)$$



Slika 6.19. Tokovi strujnog (Φ_s) i naponskog elektromagneta (Φ_n) u mjernom sistemu brojila: (a) uz zanemarenje gubitaka, (b) u izvedenom brojilu

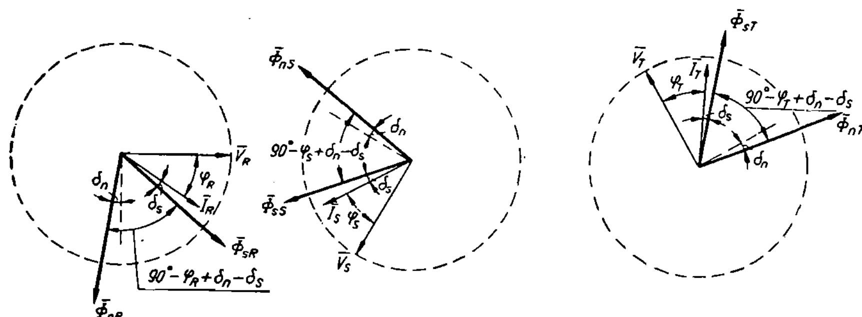
pa će moment brojila biti proporcionalan djelatnoj snazi samo ako je $\delta_n = \delta_s$. To se može postići pogodnim dimenzioniranjem magnetskog shunta (udešenje kuta δ_n) i dodatnim namotom od nekoliko zavoja oko jezgre strujnog elektromagneta, koji je namot opterećen petljom od otpornog materijala. Pomicanjem premoštenja petlje mijenja se njen otpor, a time i kut δ_s.

Aluminijska ploča vrti se također među polovima permanentnog magneta, pa se pojavljuje kočni moment proporcionalan brzini vrtnje. Aluminijska ploča imat će onu brzinu vrtnje pri kojoj je zakretni moment jednak momentu kočenja. Brzina vrtnje bit će jednaka djelatnoj snazi, koja je određena naponom U i strujom I, pa će brojilo registrirati na brojčaniku, spojenom preko zupčanika s osovinom aluminijske ploče, količinu energije.

Ako dakle pretpostavimo da je postignuta jednakost $\delta_n = \delta_s$, doći ćemo do relacije (6.19), odnosno (6.20), pa prema tome i do zaključka da se brojila djelatne energije spajaju isto kao i vatmetri. To, naravno, vrijedi za brojila sa dva (sl. 6.2) i sa tri mjerna sistema (sl. 6.9.).

Ukupni moment brojila sa tri mjerna sistema — analogno relaciji (6.17), a prema sl. 6.20. — iznosi

$$M = k\,(\Phi_{sR}\Phi_{nR}\sin\psi_R + \Phi_{sS}\Phi_{nS}\sin\psi_S + \Phi_{sT}\Phi_{nT}\sin\psi_T) \qquad \ldots (6.22)$$



Slika 6.20. Struje, naponi i tokovi mjernih sistema brojila djelatne energije s tri mjerna sistema

gdje je ψ kut među tokovima. Uzimajući u obzir fazni pomak između struje i toka, odnosno između napona i toka, možemo postaviti da je

$$\psi_R = 90^0 - \varphi_R + \delta_n - \delta_s \qquad \ldots (6.23)$$

Analogno vrijedi za ostala dva mjerna sistema. Budući da su tokovi proporcionalni strujama odnosno naponima, te da mora biti ispunjen uvjet $\delta_n = \delta_s$, relaciju (6.22) možemo napisati u obliku

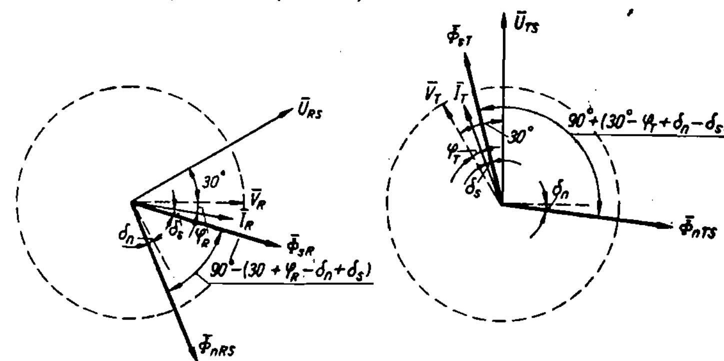
$$M = k_1\,(I_R V_R\cos\varphi_R + I_S V_S\cos\varphi_S + I_T V_T\cos\varphi_T) \qquad \ldots (6.24)$$

Brojilo prema tome registrira energiju trofaznog sistema.

Ukupni moment brojila sa dva mjerna sistema dobivamo iz relacije

$$M = k\,(\Phi_{sR}\Phi_{nRS}\sin\psi_R + \Phi_{sT}\Phi_{nTS}\sin\psi_T) \qquad \ldots (6.25)$$

Do relacije (6.25) dolazimo prema sl. 6.21. Kutovi ψ_R i ψ_T jesu kutovi među tokovima, koji iznose (sl. 6.21)



Slika 6.21. Struje, naponi i tokovi mjernih sistema brojila djelatne energije s dva mjerna sistema

$$\psi_R = 90^0 - (30^0 + \varphi_R - \delta_n + \delta_s) \qquad \ldots (6.26a)$$

$$\psi_T = 90^0 + (30^0 - \varphi_T + \delta_n - \delta_s) \qquad \ldots (6.26b)$$

Ako uzmemo u obzir da su tokovi proporcionalni strujama, odnosno naponima, te da mora biti postignuta jednakost $\delta_n = \delta_s$, ukupni moment iznosi

$$M = k_1\,[I_R U_{RS}\cos(30^0 + \varphi_R) + I_T U_{TS}\cos(30^0 - \varphi_T)] \qquad \ldots (6.27)$$

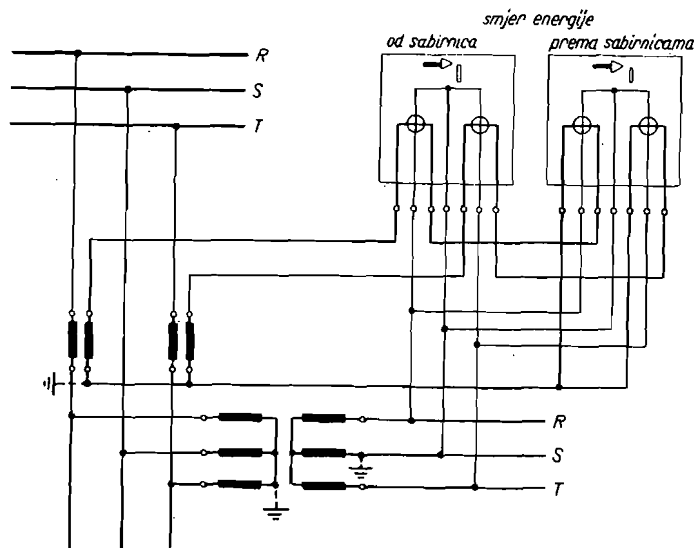
koji je proporcionalan snazi u trofaznom sistemu, što izlazi iz (6.1a).

Kao i pri mjerenju snage, i sada se postavlja pitanje da li treba upotrijebiti brojila sa dva ili sa tri mjerna sistema. S obzirom na tačnost mjerenja, brojila se vladaju kao vatmetri. Tačnost mjerenja, međutim, ima za brojila u nekim slučajevima veću važnost. Moramo naime razlikovati brojila za pogonsku kontrolu od onih na temelju kojih se vrši obračun energije bilo s potrošačima, bilo s poduzećima koja vrše distribuciju električne energije.

Kad se radi o brojilima za pogonsku kontrolu, obično nismo osjetljivi na pogreške u njihovu pokazivanju za vrijeme zemnog spoja u mreži s prigušnicom u nul-tački tranformatora, a pogotovo ne na pogreške za vrijeme kratkotrajnog jednopolnog kratkog spoja u mreži s neposredno uzemljenom nul-tačkom. Radi toga se za pogonsku kontrolu mogu upotrijebiti brojila sa dva mjerna sistema.

Kad brojilo služi za obračun energije, a pogotovo kad se radi o velikim količinama energije, treba upotrijebiti brojilo sa tri mjerna sistema u mrežama s nul-tačkom uzemljenom preko prigušnice, dok je brojilo sa dva mjerna sistema dovoljno tačno za mreže s neposredno uzemljenom ili izoliranom nul-tačkom.

Ako se u odvodu može promijeniti smjer energije (jednom se energija dovodi na sabirnice, a drugi put sa njih odvodi), jedno brojilo nije dovoljno, jer bi pokazivalo razliku dovedene i odvedene energije. Zbog toga se postavljaju dva brojila priključena na iste strujne transformatore, ali sa zamijenjenim priključnicama za strujne svitke (sl. 6.22). Samom zamjenom priključnica ne bi bilo ništa postignuto, jer bi oba brojila opet pokazivala razlike energija, pa su zato u njih ugrađeni zapori povratnog hoda, koji sprečavaju okretanje aluminijske ploče u obrnutom smjeru. To je mehanički jednostavan uređaj, koji omogućuje okretanje u jednom smjeru bez kočenja. Jedno brojilo pokazuje, dakle, količinu energije koja (sl. 6.22) ima smjer od sabirnica, a drugo onu koja dolazi prema sabirnicama.



Slika 6.22. Priključak dvaju brojila za različite smjerove djelatne energije

Pri preciznim mjerenjima energije potrebno je strujne svitke brojila priključiti na posebne jezgre strujnih transformatora i to posebnim vodovima od svake priključnice strujnog transformatora do brojila.

Brojilo je baždareno za određeni prijenosni omjer strujnih transformatora (I_n/i_n) i prijenosni omjer naponskih transformatora (U_n/u_n), pa je za te prijenosne omjere određena konstanta brojila. Konstanta brojila (C) jest broj s kojim treba pomnožiti razliku očitanja na brojčaniku, da bi se dobila količina energije. Osim konstante, na pločici brojila navedeni su prijenosni omjeri strujnih i naponskih transformatora za koje vrijedi ta konstanta. Nema međutim nikakve zapreke da se brojilo priključi na strujne i naponske transformatore drugih prijenosnih omjera, uz uvjet da su sekundarna nazivna struja i sekundarni nazivni napon ostali nepromijenjeni. Veća odstupanja od nazivnih sekundarnih veličina dovela bi

do preopterećenja namota ili do većih pogrešaka. Ako, dakle, brojilo priključimo na mjerne transformatore s izmijenjenim prijenosnim omjerima promijenit će se konstanta brojila, koja se može odrediti iz relacije

$$C' = \frac{I_n'}{i_n'} \frac{U_n'}{u_n'} \frac{i_n}{I_n} \frac{u_n}{U_n} C \qquad \ldots (6.28)$$

gdje su I_n'/i_n' i U_n'/u_n' prijenosni omjeri novih mjernih transformatora. Ako npr. brojilo za prijenosne omjere 200/5 A i 10000/100 V mjernih transformatora ima konstantu $C = 10$, nova konstanta nakon priključaka na druge mjerne transformatore prijenosnih omjera 350/5 i 30000/100 V iznosit će

$$C = \frac{350}{5} \frac{30000}{100} \frac{5}{200} \frac{100}{10000} 10 = 52{,}5$$

b) Brojila jalove energije

Spoj brojila jalove energije može se izvesti prema istim shemama spoja koje vrijede za varmetre (sl. 6.11. i 6.16). Takva shema spoja naziva se spoj sa zakretanjem od 90°. S obzirom na pomak tokova dvaju elektromagneta vrijedi sve što je spomenuto prilikom prikaza rada brojila djelatne energije. I u brojilima jalove energije mora se postići da kutovi δ_s i δ_u budu međusobno jednaki.

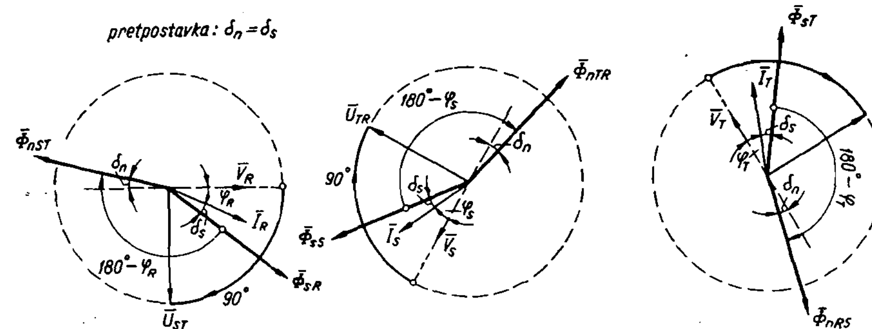
Za brojilo sa tri mjerna sistema vrijedi shema spoja na sl. 6.11, dok je dijagram struja, napona i tokova prikazan na sl. 6.23. Uzimajući u obzir relaciju (6.17), ukupni moment iznosi

$$M = k\,(\Phi_{sR}\,\Phi_{nST} \sin \psi_R + \Phi_{sS}\,\Phi_{nTR} \sin \psi_S + \Phi_{sT}\,\Phi_{nRS} \sin \psi_T) \qquad \ldots (6.29)$$

gdje je ψ kut među tokovima, a jednak je

$$\psi_R = 180^0 - \varphi_R. \qquad \ldots (6.30)$$

Analogno vrijedi za ψ_S i ψ_T. Uzimajući u obzir da mora biti $\delta_n = \delta_s$, te da su tokovi proporcionalni strujama, odnosno naponima, ukupni moment iznosi



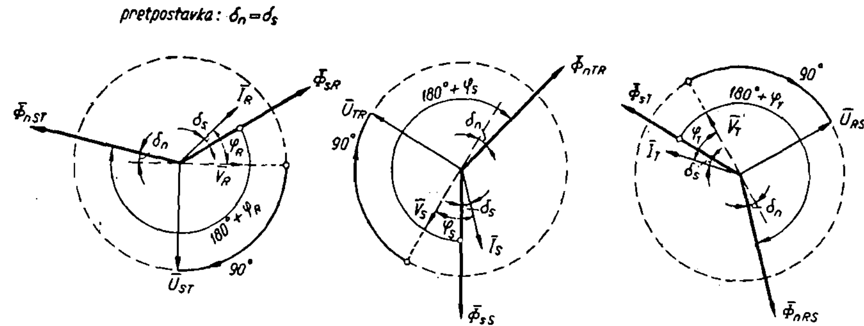
Slika 6.23. Struje, naponi i tokovi mjernih sistema brojila jalove energije s tri mjerna sistema i sa zakretom od 90° (induktivno opterećenje)

$$M = k_1 \,(I_R\, U_{ST} \sin \varphi_R + I_S\, U_{TR} \sin \varphi_S + I_T\, U_{RS} \sin \varphi_T) \quad \ldots (6.31)$$

Ukupni moment proporcionalan je dakle jalovoj snazi trofaznog sistema, jer je izraz u zagradi jednak onome u (6.7).

Pri kapacitivnom opterećenju (sl. 6.24) kutove među tokovima dobivamo iz relacije

$$\psi = 180^0 + \varphi \quad \ldots (6.32)$$



Slika 6.24. Struje, naponi i tokovi mjernih sistema brojila jalove energije s tri mjerna sistema i sa zakretom od 90⁰ (kapacitivno opterećenje)

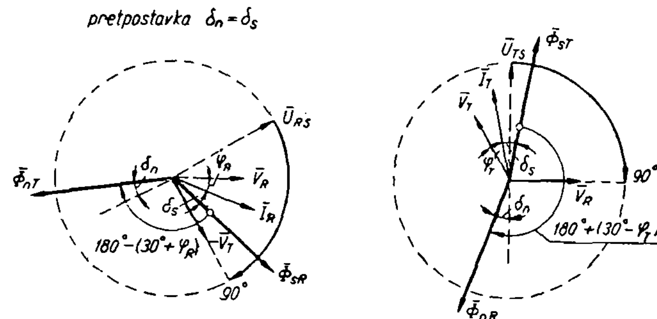
pa je ukupni moment

$$M = -k_1 \,(I_R\, U_{ST} \sin \varphi_R + I_S\, U_{TR} \sin \varphi_S + I_T\, U_{RS} \sin \varphi_T) \quad \ldots (6.33)$$

negativan u odnosu na moment za induktivno jalovo opterećenje s istim faktorom snage.

Brojilo sa dva mjerna sistema spaja se kao i varmetar (sl. 6.16). Na sl. 6.25. prikazane su struje, naponi i tokovi mjernih sistema za takvo brojilo. Ukupni momenat iznosi

$$M = k\,(\Phi_{sR}\, \Phi_{nT} \sin \psi_R + \Phi_{sT}\, \Phi_{nR} \sin \psi_T) \quad \ldots (6.34)$$



Slika 6.25. Struje, naponi i tokovi mjernih sistema brojila jalove energije s dva mjerna sistema sa zakretom od 90⁰ (induktivno opterećenje)

gdje je

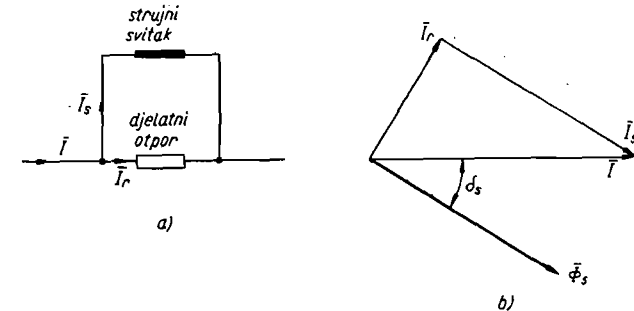
$$\psi_R = 180^0 - (30^0 + \varphi_R) \quad \ldots (6.35a)$$

$$\psi_T = 180^0 + (30^0 - \varphi_T) \quad \ldots (6.35b)$$

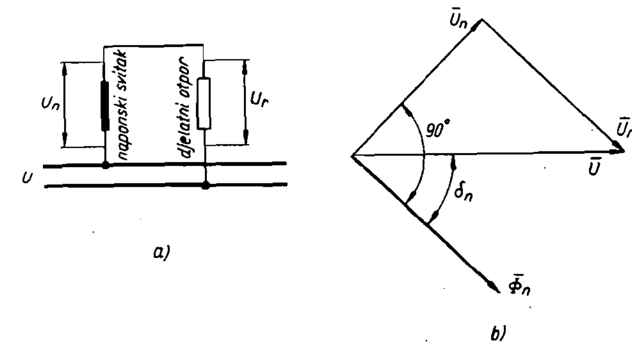
Uzimajući u obzir da su tokovi proporcionalni strujama, odnosno naponima, dobivamo za ukupni moment

$$M = k_1 \,[I_R\, V_T \sin (30^0 + \varphi_R) - I_T\, V_R \sin (30^0 - \varphi_T)] \quad \ldots (6.36)$$

Ukupni moment proporcionalan je, dakle, jalovom opterećenju trofaznog sistema što izlazi iz relacije (6.11).



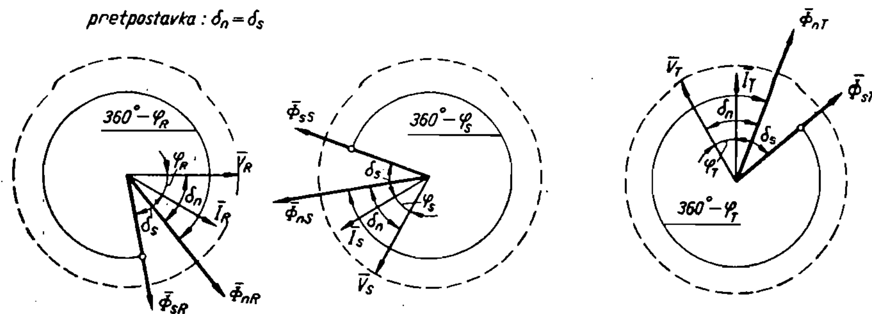
Slika 6.26. Spoj strujnog svitka brojila jalove energije: (a) shema spoja, (b) struje i tok



Slika 6.27. Spoj naponskog svitka brojila jalove energije: (a) shema spoja, (b) naponi i tok

Pri kapacitivnom opterećenju analognim razmatranjem doći ćemo do zaključka da moment ima suprotan smjer, kako je to pokazano i za varmetar sa dva mjerna sistema.

Mjerenje jalove energije može se provesti brojilima spojenim na isti način kao brojila djelatne energije. Da se postigne ispravno pokazivanje brojila, potrebno je djelatni otpor priključiti paralelno sa strujnim svitkom (sl. 6.26a), i u seriju s naponskim svitkom (sl. 6.27a).



Slika 6.28. Struje, naponi i tokovi triju mjernih sistema brojila jalove energije s paralelnim i serijskim djelatnim otporima (induktivno opterećenje)

Postavljanjem djelatnog otpora paralelno sa strujnim svitkom struja se grana na struju kroz svitak koja zaostaje za ukupnom strujom, pa i tok proizveden od te struje zaostaje za ukupnom strujom. Fazni pomak δ_s ovisi o veličini otpora i o karakteristikama svitka, pa se može postići potreban fazni pomak izborom djelatnog otpora. Na sl. 6.26b prikazan je vektorski dijagram struja i toka, uz pretpostavku da strujni svitak nema djelatnog otpora ni gubitka u željezu.

Spajanjem djelatnog otpora u seriju s naponskim svitkom, samo dio (U_n) ukupnog napona djeluje na naponski svitak. Magnetski tok ovisan je o tom naponu i zaostaje za njim za 90°. Fazni pomak (δ_n) za ukupnim naponom ovisi i sada o veličini djelatnog otpora i o karakteristikama svitka, pa se na njega može utjecati promjenom djelatnog otpora. Na vektorskom dijagramu napona i toka, nacrtanom na sl. 6.27b, zanemareni su djelatni otpor naponskog svitka i gubici u željezu.

Pogodnim izborom paralelno i serijski spojenih otpora može se postići jednakost faznih pomaka δ_s i δ_n uz istodobno kompenziranje utjecaja otpora svitaka i gubitaka u željezu.

Ukupni moment brojila sa tri mjerna sistema (sl. 6.28) iznosi

$$M = k\,[\Phi_{sR}\,\Phi_{nR}\sin(360^0 - \varphi_R) + \Phi_{sS}\,\Phi_{nS}\sin(360^0 - \varphi_S) + \\ + \Phi_{sT}\,\Phi_{nT}\,(\sin 360^0 - \varphi_T)] \quad \ldots (6.37)$$

Tokovi su proporcionalni sa strujom, odnosno s naponom, pa zbog toga relacija (6.36) prelazi u

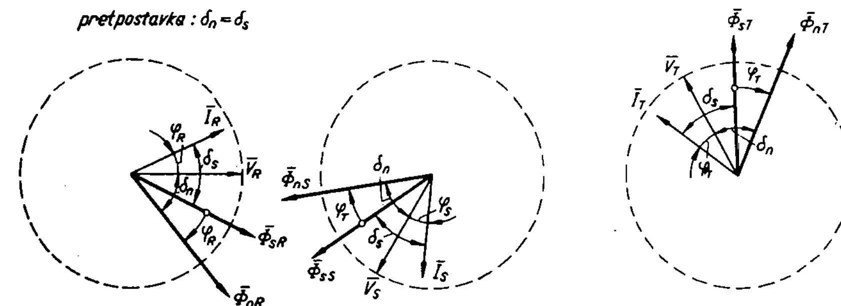
$$M = -k_1\,(I_R\,V_R\sin\varphi_R + I_S\,V_S\sin\varphi_S + I_T\,V_T\sin\varphi_T) \quad \ldots (6.38)$$

Moment je, dakle, proporcionalan jalovom opterećenju trofaznog sistema. Promjena predznaka moguća je zamjenom početaka i krajeva bilo strujnih, bilo naponskih svitaka.

Pri kapacitivnom opterećenju (sl. 6.29) dolazimo do izraza (6.38), ali s pozitivnim predznakom.

Ukupni moment brojila jalove snage sa dva mjerna sistema (sl. 6.30) iznosi

$$M = k\,\{\Phi_{sR}\,\Phi_{nRS}\sin[360^0 - (30^0 + \varphi_R)] + \Phi_{sT}\,\Phi_{nTS}\sin(30^0 - \varphi_T)\} \quad \ldots (6.39)$$



Slika 6.29. Struje, naponi i tokovi triju mjernih sistema brojila jalove energije s paralelnim i serijskim djelatnim otporima (kapacitivno opterećenje)

odakle je

$$M = -k_1\,[I_R\,U_{RS}\sin(30^0 + \varphi_R) - I_T\,U_{TS}\sin(30^0 - \varphi_T)] \quad \ldots (6.40)$$

Izraz u zagradi proporcionalan je jalovom opterećenju trofaznog sistema, što izlazi iz relacije (6.11a).

Za kapacitivno opterećenje (sl. 6.31) ukupni je moment

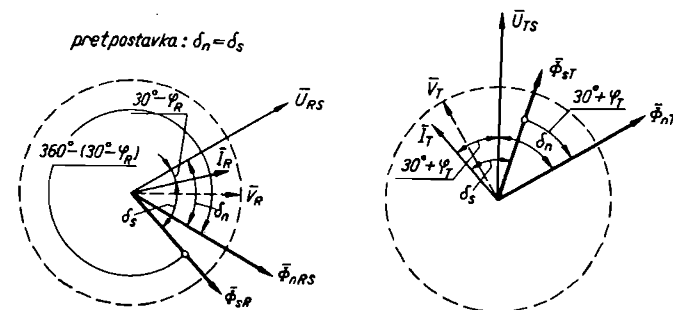
$$M = k\,\{\Phi_{sR}\,\Phi_{nRS}\sin[360^0 - (30^0 - \varphi_R)] + \\ + \Phi_{sT}\,\Phi_{nTS}\sin(30^0 + \varphi_T)\} \quad \ldots (6.41)$$

pa je

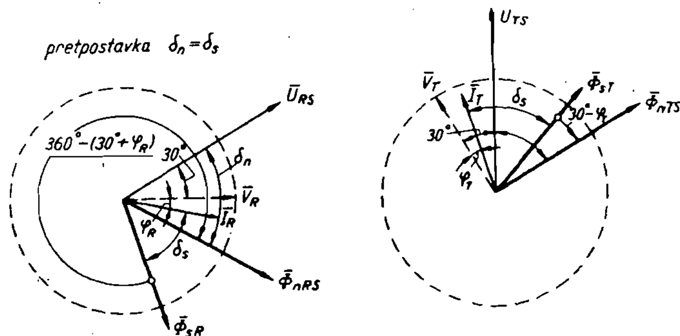
$$M = -k_1\,[I_R\,U_{RS}\sin(30^0 - \varphi_R) - I_T\,U_{TS}\sin(30^0 + \varphi_T)] \quad \ldots (6.42)$$

I sada je izraz u uglatoj zagradi proporcionalan jalovom opterećenju, što se može vidjeti iz (6.13a).

Kao i u brojilu sa tri mjerna sistema, i u brojilu sa dva mjerna sistema momenti imaju suprotan predznak prema momentima brojila sa zakretom od 90°, koji su ranije opisani. O tomu treba povesti računa prilikom priključka brojila.



Slika 6.30. Struje, naponi i tokovi dvaju mjernih sistema brojila jalove energije s paralelnim i serijskim djelatnim otporima (induktivno opterećenje)



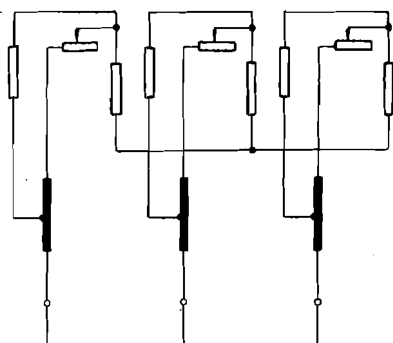
Slika 6.31. Struje, naponi i tokovi dvaju mjernih sistema brojila jalove energije s paralelnim i serijskim djelatnim otporima (kapacitivno opterećenje)

Da bi se omogućilo udešenje kuta δ_n između napona i toka naponskog svitka (sl. 6.27), neke tvornice mjesto serijskog otpora upotrebljavaju kombinaciju otpora (sl. 6.32).

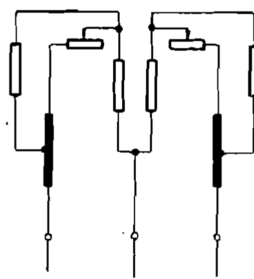
Na sl. 6.33. prikazan je priključak brojila jalove energije sa tri mjerna sistema s paralelnim i serijskim djelatnim otporima, a na sl. 6.34. priključak brojila jalove energije sa dva mjerna sistema.

Za mjerenje djelatne i jalove induktivne energije u odvodu u kojemu djelatna energija može teći samo od sabirnica (ili samo prema sabirnicama) i koji može biti samo induktivno (ili samo kapacitivno) opterećen, dovoljno je po jedno brojilo djelatne i jalove energije (sl. 6.35). Ako je međutim moguće i kapacitivno opterećenje, potrebno je postaviti dva brojila jalove energije, od kojih će jedno registrirati induktivnu, a drugo kapacitivnu jalovu energiju. Da bi se odvojeno registrirale te dvije jalove energije, treba u oba brojila ugraditi zapore povratnog hoda, kao i u brojilima djelatne energije (sl. 6.22).

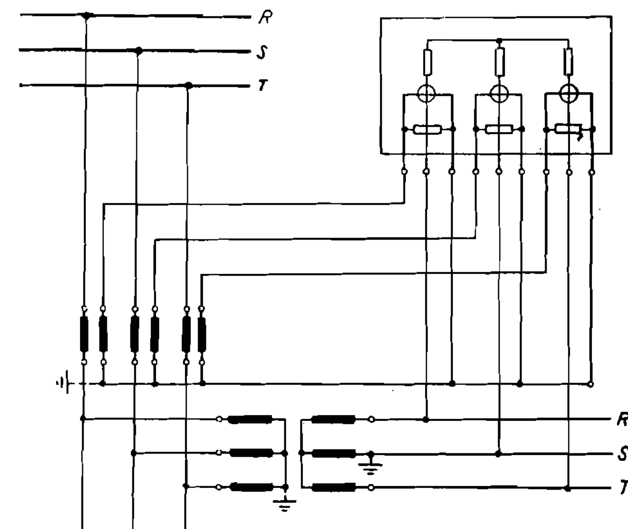
a) tri mjerna sistema



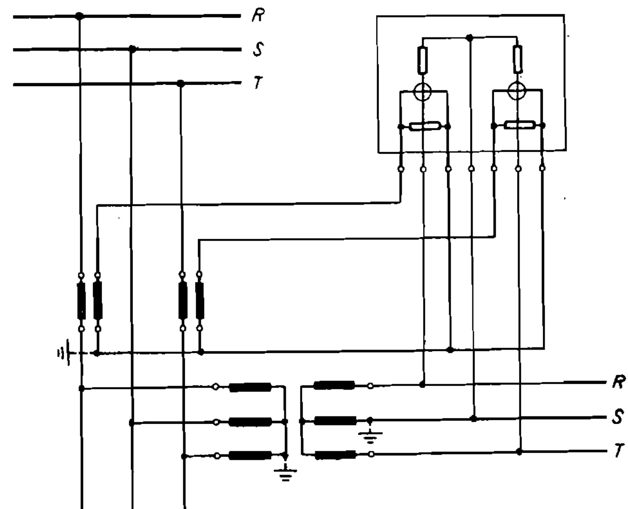
b) dva mjerna sistema



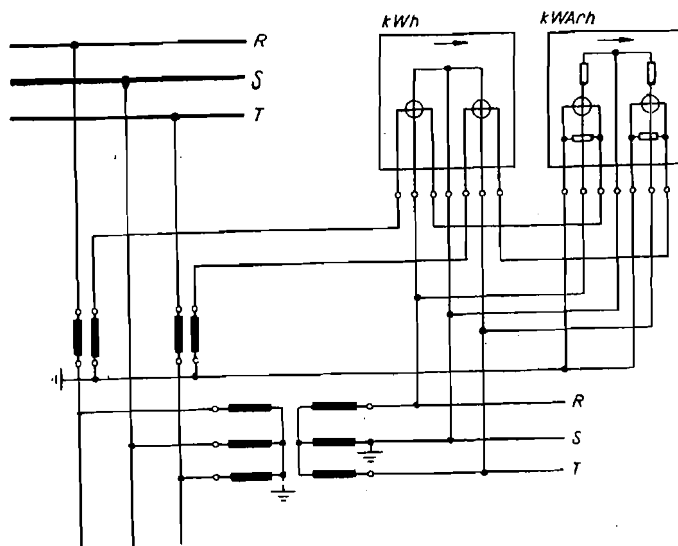
Slika 6.32. Shema spoja otpornika uz naponski svitak brojila jalove energije prema izvedbi tvornice Landis i Gyr



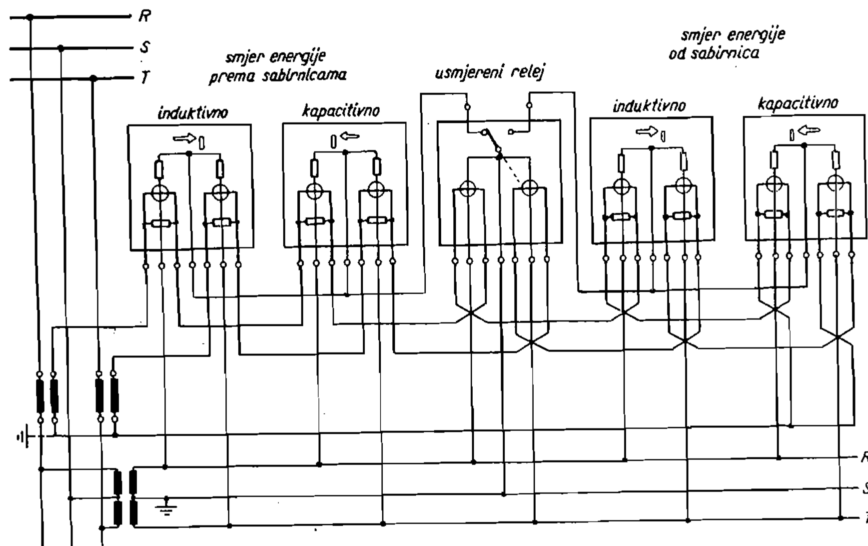
Slika 6.33. Priključak brojila jalove energije s tri mjerna sistema i s paralelnim i serijskim djelatnim otporima



Slika 6.34. Priključak brojila jalove energije s dva mjerna sistema i s paralelnim i serijskim djelatnim otporima



Slika 6.35. Priključak brojila za djelatnu i jalovu energiju u slučaju kad je moguć samo jedan smjer energije i samo induktivno jalovo opterećenje



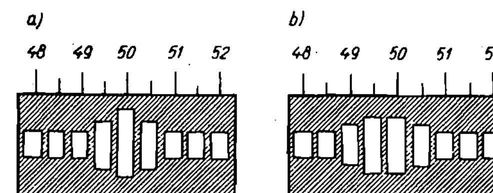
Slika 6.36. Priključak sloga brojila jalove energije za različite smjerove djelatne energije

Registriranje jalove energije, ako ona može postati i induktivna i kapacitivna, kad se mijenja smjer djelatne energije, nije moguće postići bez dodatnog usmjerenog releja (sl. 6.36) koji uključuje brojila u ovisnosti o smjeru djelatne energije. Tada su za registriranje jalove energije potrebna četiri brojila jalove energije, po dva za svaki smjer, od kojih jedno registrira induktivnu, a drugo kapacitivnu energiju. Brojila za kapacitivnu energiju na shemi (sl. 6.36) spojena su tako da se kapacitivna energija registrira kao negativna jalova energija.

F. Mjerila frekvencije

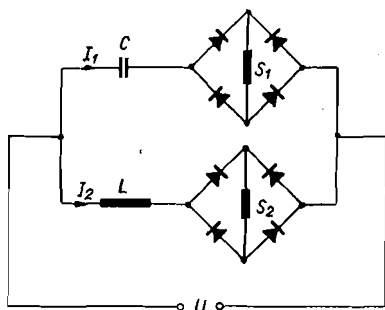
U rasklopnim postrojenjima upotrebljavaju se dvije vrste mjerila frekvencije: pretežno ona s jezičcima, a iznimno ona s kazaljkom. Obje vrste mjerila priključuju se kao voltmetri.

Mjerila s jezičcima koriste pojavu mehaničke rezonancije čeličnih pera u obliku jezičaca, koji titraju pod utjecajem elektromagneta spojenog na napon mreže. Svaki jezičac rezonira na drugu frekvenciju, koja se obično razlikuje od frekvencije susjednog jezičca za 0,5 Hz. Kad mjerilo nije priključeno, vidi se niz jednakih bijelih zastavica, koje miruju. Kad se mjerilo priključi zatitraju jezičci čija je frekvencija rezonacije jednaka, ili vrlo bliza, frekvenciji mreže. To se titranje pokazuje kao prividno produljenje bijele zastavice. Ako je npr. frekvencija mreže 50 Hz, rezonirat će jezičac čija je vlastita frekvencija upravo 50 Hz (sl. 6.37a). Susjedni jezičci za 49,5 i 50,5 Hz također titraju, ali znatno manje. S obzirom na to da jezičac 50 Hz najviše titra, a susjedni titraju podjednako, može se zaključiti da je frekvencija mreže upravo 50 Hz. Ako međutim dva susjedna jezičca titraju podjednako (49,5 i 50 Hz na sl. 6.37b), znači da je frekvencija mreže jednaka aritmetičkoj sredini frekvencija koje odgovaraju tim jezičcima (49,75 Hz za primjer na sl. 6.37b). Takvim rezoniranjem može se ocijeniti frekvencija mreže s tačnošću od skoro 0,1 Hz. To je dovoljna tačnost za kontrolu u pogonu.



Slika 6.37. Primjeri pokazivanja mjerila frekvencije s jezičcima

Za tačnije mjerenje za vođenje pogona mreže s obzirom na održavanje frekvencije, te kad se želi registriranje frekvencije, upotrebljavaju se mjerila s kazalom. Takva mjerila izvode se kao kvocijentna mjerila indukcionog, elektrodinamskog tipa, ili pak s mekim željezom, te kao instrumenti s unakrsnim svicima priključeni preko suhih ispravljača. Postoji niz izvedaba (Lit. 94), od kojih će biti prikazan princip jedne od novijih

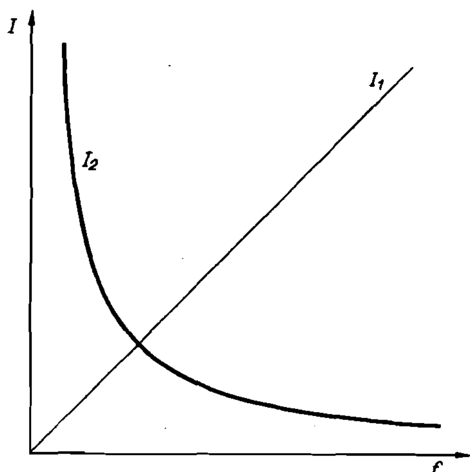


Slika 6.38. Osnovna shema spoja mjerila frekvencije s unakrsnim svicima (S_1 i S_2), koje ima znatnu pogrešku kod viših harmoničkih članova

(Lit. 93). Kad u mreži ne bi postojale više frekvencije, moglo bi se upotrijebiti mjerilo frekvencije prema shemi na sl. 6.38. Svitak S_1 instrumenta s unakrsnim svicima napaja se preko kondenzatora, dok je svitak S_2 priključen preko prigušnice L. Struje kroz svitke iznose

$$I_1 = U C \omega \qquad \dots (6.43)$$

$$I_2 = \frac{U}{\omega L} \qquad \dots (6.44)$$



Slika 6.39. Ovisnost struja I_1 i I_2 o frekvenciji za shemu spoja na sl. 6.38.

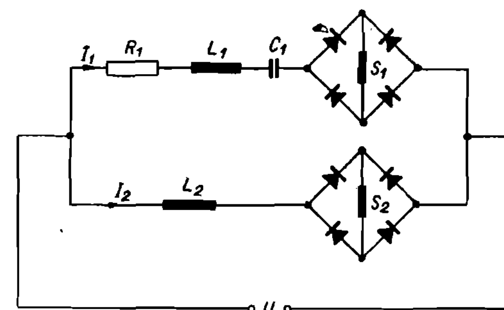
Otklon instrumenta (α) s unakrsnim svicima ovisi o omjeru struja kroz svitke, pa je

$$\alpha = \mathrm{f}\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \mathrm{f}\,(L\,C\,\omega^2) \qquad \dots (6.45)$$

Budući da su L i C konstante, otklon kazaljke ovisi o frekvenciji mreže. Postojanje viših harmoničkih dovodi međutim do znatnijih pogrešaka i pored konstantnosti osnovne frekvencije. To se vidi iz dijagrama na sl. 6.39. Pojavom npr. napona trostruke frekvencije znatno više će porasti

struja I_1 od struja I_2, pa će to dovesti do dodatnog povećanja otklona i pored toga što se osnovna frekvencija nije promijenila. Utjecaj viših harmoničkih može se eliminirati ako se pored kondenzatora u istu granu postavi prigušnica (sl. 6.40), koja je u rezonanciji s kondenzatorom pri frekvenciji nešto većoj od normalne frekvencije mreže. Struja u toj grani tada je

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R^2_1 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \qquad \dots (6.46)$$



Slika 6.40. Osnovna shema spoja mjerila frekvencije unakrsnim sviscima, na čije pokazivanje nemaju praktički utjecaja viši harmonički članovi

Pri frekvenciji f_r javlja se rezonancija, pa je tada

$$\omega_r L_1 = \frac{1}{\omega_r C_1} \qquad \dots (6.47)$$

Ako postavimo

$$m = \frac{\omega_r L_1}{R_1} \qquad \dots (6.48a)$$

$$n = \frac{f}{f_r} = \frac{\omega}{\omega_r} \qquad \dots (6.48b)$$

dobivamo

$$I_1 = \frac{U}{R_1 \sqrt{1 + \left(mn - \frac{m}{n}\right)^2}} \qquad \dots (6.49)$$

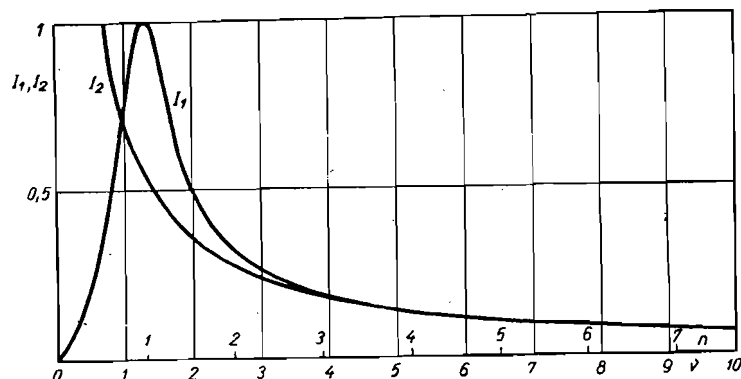
U drugoj grani, uz zanemarenje malog otpora prigušnice, struja iznosi

$$I_2 = \frac{U}{\omega L_2} = \frac{U}{2\pi f_0 L_2}\,\frac{f_0}{f} = \frac{U}{2\pi f_0 L_2}\,\frac{1}{\nu} \qquad \dots (6.50)$$

gdje je

$$\nu = \frac{f}{f_0} \qquad \dots (6.51)$$

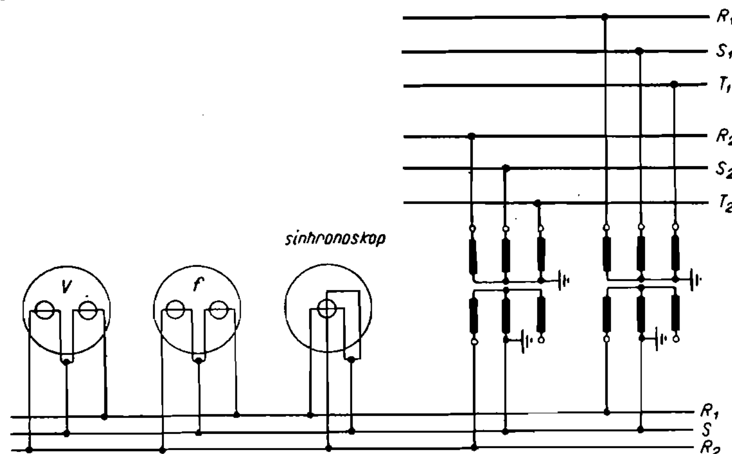
dakle omjer stvarne frekvencije i normalne frekvencije mreže. Izborom omjera m (6.48a) i induktiviteta L_2 može se postići da je $I_1 \cong I_2$ za više harmoničke članove. Na sl. 6.41. prikazana je ovisnost struja I_1 i I_2 o frekvenciji za $m = 2$, $f_r/f_0 = 1,3$, dok je L_2 tako odabran da za frekvenciju f_0 iznosi $I_2 \cong 0,7\, I_{1\,max}$.



Slika 6.41. Ovisnost struje I_1 i I_2 o frekvenciji za shemu spoja na sl. 6.40.

G. Uređaji za sinhronizaciju

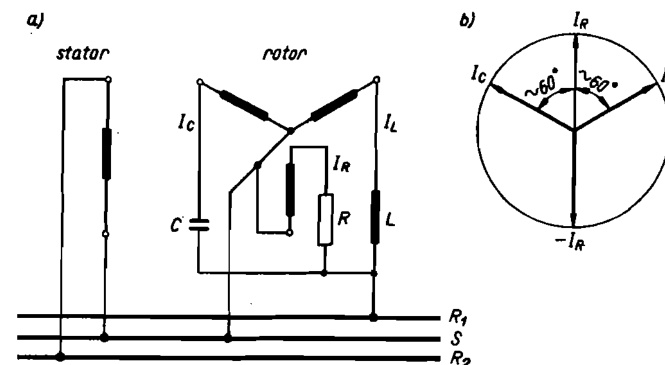
Uređaj za sinhronizaciju normalno se sastoji od dvostrukog voltmetra, dvostrukog mjerila frekvencije i sinhronoskopa. U dvostrukom voltmetru i u dvostrukom mjerilu frekvencije postoje dva mjerna sistema, koji su priključeni na dva napona koja se uspoređuju. Oba instrumenta služe za



Slika 6.42. Priključak dvostrukog voltmetra, dvostrukog mjerila frekvencije i sinhronoskopa

grubu orijentaciju o naponima i frekvencijama generatora ili mreža koje treba paralelno spojiti. Da bi se međutim utvrdila jednakost frekvencija i jednakost faznog pomaka među naponima, naponi koji se uspoređuju priključuju se i na sinhronoskop. Shema spoja uređaja za sinhronizaciju prikazana je na sl. 6.42. (pretpostavljena je sinhronizacija mreža priključenih na dva sistema sabirnica).

Sinhronoskop se normalno izvodi za jednofazni priključak (sl. 6.43), a sastoji se od statora sa dva namotana pola i od rotora sa tri namota pomaknuta međusobno za 120^0. Da se postigne okretno polje u rotoru s priključkom na jedan napon, u seriju s namotima rotora spaja se djelatni otpor R, prigušnica L i kondenzator C. Struja I_L zaostaje, a struja I_C prethodi struji I_R (sl. 6.43), pa se zamjenom početka s krajem namota



Slika 6.43. Shema spoja i struje u rotoru sinhronoskopa

kroz koji protječe struja I_R, dobiva trofazni sistem struja, koji se malo razlikuje od simetričnog trofaznog sistema. Takav sistem struja proizvodi okretno polje rotora. Namot statora proizvodi izmjenično polje iste frekvencije kao i mreža priključena na stator, dok struje rotora proizvode okretno polje koje rotira prema frekvenciji mreže priključene na rotor. Djelovanje sinhronoskopa osniva se na međusobnom djelovanju tih dvaju polja. Rotor se nastoji tako postaviti da se vektor okretnog polja poklopi sa smjerom izmjeničnog polja u trenutku maksimalne vrijednosti izmjeničnog polja.

Zamislimo da je u jednom momentu postignuto da se vektor okretnog polja poklopi s smjerom izmjeničnog polja baš u trenutku kad izmjenično polje ima maksimum, ali da je frekvencija struje u rotoru manja od frekvencije u statoru. Vektor okretnog polja, koji npr. rotira u smjeru kazaljke na satu, nakon jedne periode naći će se lijevo od smjera izmjeničnog polja, kad izmjenično polje postigne maksimalnu vrijednost. Zbog toga će se rotor zakrenuti u smjeru kazaljke na satu. Nakon daljnje periode ponovit će se isto, pa će se zbog toga rotor okretati u smjeru kazaljke na satu. Kad je frekvencija struje u rotoru veća od frekvencije struje u statoru, rotor će se okretati u suprotnom smjeru. Smjer okretanja kazaljke koja je spojena s osovinom rotora pokazivat će, dakle, da li generatorima u

mreži, čiji je napon priključen na stator, treba smanjiti ili povećati broj okretaja.

Ako su frekvencije mreža međusobno jednake, rotor će se zaustaviti i to na položaju koji odgavara faznom pomaku među naponima mreže. Uvjet mirovanja rotora bit će, naime, ispunjen za određeni položaj rotora, jer će samo u tom njegovom položaju biti postignuto poklapanje vektora okretnog polja i maksimuma izmjeničnog polja. Kad su naponi u fazi kazaljka će se postaviti u određen položaj, obično u sredinu gornje polovine sinhronoskopa.

Prema tome sinhronoskop istodobno pokazuje da li postoji međusobna jednakost frekvencija i faza u mrežama koje međusobno treba spojiti. Tek nakon što se kazaljka sinhronoskopa postavila u položaj koji pokazuje da su ta dva uvjeta ispunjena mogu se mreže spojiti, opet uz uvjet da je prethodno postignuta približna jednakost napona, što se može kontrolirati dvostrukim voltmetrom.

6.3. UPOTREBA MJERNIH INSTRUMENATA

U generatorski odvod obično postavljamo

a) tri ampermetra (u svaku fazu po jedan) za mjerenje struje, kako bi se mogla kontrolirati simetričnost opterećenja generatora,

b) voltmetar s preklopkom, priključen na naponske transformatore spojene između generatorskih priključnica i generatorske sklopke,

c) vatmetar i varmetar, koji su priključeni na iste strujne i naponske transformatore kao i ampermetri i volmetar,

d) brojilo djelatne, a koji put i jalove energije (priključeni kao vatmetar i varmetar),

e) ampermetar (i voltmetar) u uzbudnom krugu generatora.

U transformatorski odvod obično se postavlja

a) ampermetar samo u jednoj fazi, radi kontrole opterećenja transformatora.

U posebnim slučajevima mogu se postaviti brojila, pa i vatmetar i varmetar, ako je primarna ili sekundarna strana transformatora mjerodavna za obračun energije, odnosno ako se želi znati ukupno opterećenje ili ukupni potrošak vodova koje napaja transformator, što je međutim izniman slučaj.

U odvodu voda obično postavljamo

a) ampermetar samo u jednu fazu, radi kontrole opterećenja voda,

b) brojila djelatne i jalove energije — za mjerenje u jednom ili u oba smjera — upotrijebit ćemo za važnije vodove, kad se na njima vrši obračun energije i sl.,

c) vatmetar i varmetar samo u vrlo važnim vodovima, u kojima je radi ispravnog vođenja pogona potrebno poznavati momentana opterećenja,

d) voltmetar, ako postoji naponski transformator u odvodu.

U mjerno polje postavljamo

a) voltmetar s preklopkom, za mjerenje linijskih (ili i linijskih i faznih) napona,

b) mjerilo frekvencije,

c) volmetar za mjerenje napona nul-tačke prema zemlji, ako postoji mogućnost priključka takvog voltmetra,

d) uređaj za sinhronizaciju, ako postoji potreba i mogućnost sinhronizacije.

Mjerni instrumenti (a do c) postavljaju se za svaki sistem sabirnica posebno.

U spojnom polju postavlja se

a) ampermetar u jednoj od faza.

SEDMO POGLAVLJE

ZAŠTITA U RASKLOPNOM POSTROJENJU

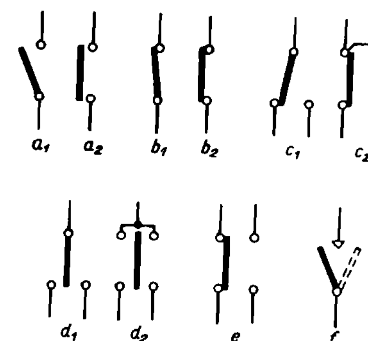
7.1. OPCENITO O RELEJIMA

Relej je uređaj koji djelovanjem relativno male električke ili mehaničke snage može uklopiti veću snagu. To uklapanje može relej izvršiti bez vremenskog zatezanja ili s vremenskim zakašnjenjem.

Razlikujemo mjerne i pomoćne releje. Mjerni su oni koji uz održavanje neke određene tačnosti uzrokuju ili sprečavaju neko djelovanje, ako fizikalna veličina (struja, napon, snaga, broj okretaja i sl.) koja na njih djeluje prekorači određenu vrijednost ili padne ispod nje. Pomoćni releji su pak oni koji ne mjere, nego djeluju zbog pojave ili znatne promjene fizikalne veličine na koju su osjetljivi bez naročite tačnosti, te uslijed te promjene stanja dovode do uklapanja ili isklapanja kontakata.

Zaštitni uređaj sastavljen je od releja i pomoćnih naprava (mjerni transformatori, pomoćni releji, pomoćni izvor struje), da bi zaštitio neki dio postrojenja od posljedica nenormalnih pogonskih događaja ili da bi ograničio štetu od već nastalog kvara.

U zaštitnom uređaju može biti jedan ili više releja (složeni relej), koji mogu biti izvedeni u posebnim ili u zajedničkom kućištu. Glavni članovi složenog releja jesu: a) poticajni član, koji će proraditi kad se prekorači ili podbaci udešena vrijednost i koji stavlja u pogon ostale članove releja; b) usporni član, koji dopušta ili sprečava pokretanje daljnjih članova releja, što ovisi o vremenu koje je proteklo od djelovanja



Slika 7.1. Vrste kontakata prema vrsti sklapanja; (a) radni kontakt, (b) mirni kontakt, (c) prijeklopni kontakt, (d) izbirni kontakt, (e) izmjenični kontakt, (f) prolazni kontakt

poticajnog člana; c) usmjerni član, koji dopušta ili sprečava zatvaranje ili otvaranje kontakta, u ovisnosti o smjeru energije.

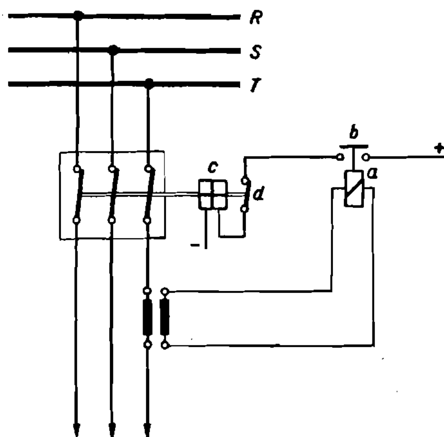
Osim magnetskih svitaka i ostalih mehaničkih uređaja, u relejima postoje kontakti koji se otvaraju ili zatvaraju djelovanjem releja. Oni su najčešće izvedeni od srebra ili srebrnih legura. Kontakti se prema načinu sklapanja dijele na (sl. 7.1): a) radne, koji su otvoreni kad je svitak releja neuzbuđen ili nedovoljno uzbuđen, b) mirne, koji su zatvoreni ako je svitak releja neuzbuđen ili nedovoljno uzbuđen, c) prijeklopne, koji se sastoje od radnog i mirnog kontakta sa zajedničkim dovodom, d) izbirne, koji se sastoje od dva radna kontakta, te imaju srednji položaj pri kojem nije nijedan od dva strujna kruga zatvoren, e) izmjenične, koji imaju i radni i mirni kontakt, koji spajaju različite strujne krugove i f) prolazne kontakte, koji samo kratkotrajno zatvaraju strujni krug i onda, ako je pripadni svitak uzbuđen i dulje vremena.

7.2. NAČINI OKIDANJA

Najčešće relej djeluje na isklapanje sklopke. Da se isklopi sklopka, potrebno je ukloniti neki zapor koji oslobađa energiju akumuliranu u nategnutom peru ili komprimiranom zraku. Uklanjanje zapora vrši se okidačem. Svitak okidača napajan je najčešće istosmjernom strujom iz akumulatorske baterije, rjeđe izmjeničnom iz strujnih transformatora.

A. Okidanje istosmjernom strujom

Prednosti okidanja istosmjernom strujom jesu: jednostavne i pregledne sheme spoja, lagan nadzor nad strujnim krugovima, nepostojanje dodatnog opterećenja strujnih i naponskih transformatora.



Slika 7.2. Primjer okidanja istosmjernom strujom; (a) relej, (b) kontakt releja, (c) okidač sklopke, (d) pomoćni kontakt okidača

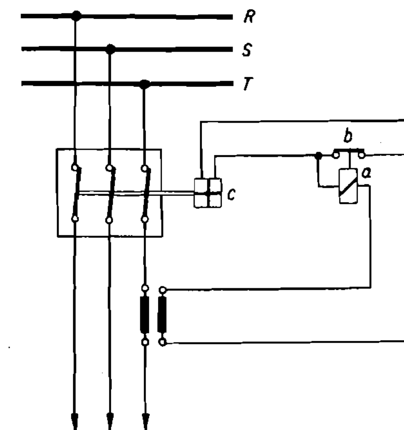
Najčešće se okida radnom strujom (sl. 7.2), što se postiže uklapanjem svitka za okidanje u okidaču sklopke (c) u strujni krug istosmjerne struje preko kontakta releja (b). Svitak releja (a) priključen je na sekundarni namot strujnog transformatora, pa relej djeluje kad struja u odvodu, odnosno na sekundarnoj strani strujnog transformatora pređe određenu vrijednost. Budući da kontakti zaštitnih releja za okidanje istosmjernom strujom nisu pogodni da preuzmu i isklapanje kruga istosmjerne struje, često se u krug istosmjerne struje postavlja i pomoćni kontakt (d) koji je mehanički vezan s osovinom sklopke, a otvara se kad se sklopka isklopi.

Potrošak okidača ovisi o izvedbi sklopke i njega samog, a kreće se između 20 i 200 W. Opterećenje je samo kratkotrajno, za vrijeme isklapanja sklopke.

B. Okidanje izmjeničnom strujom

Okidanje izmjeničnom strujom iz posebnog izvora praktički ne dolazi u obzir, a po izvedbi se jedva razlikuje od okidanja istosmjernom strujom.

Niti napajanje izmjeničnom strujom iz naponskih transformatora ne dolazi u obzir. U slučaju kratkog spoja, naime, napon može toliko opasti da struja kroz svitak okidača neće biti dovoljna za okidanje.

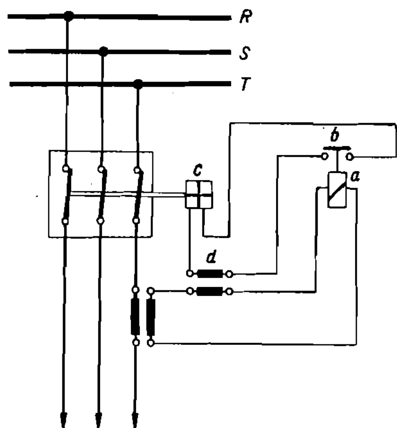


Slika 7.3. Primjer okidanja strujom iz strujnog transformatora s mirnim kontaktom; (a) relej, (b) mirni kontakt releja, (c) okidač sklopke

Praktički se okidanje izmjeničnom strujom može ostvariti jedino strujom strujnog transformatora, jer u trenutku kad je okidanje potrebno, kroz strujni transformator teče velika struja (kratak spoj, preopterećenje). Svitak okidača normalno je priključen na isti strujni transformator na koji je priključen i zaštitni relej. Takvi strujni transformatori moraju imati toliku snagu da sekundarna struja bude dovoljna za pokretanje zaštitnog releja i okidača. U većini slučajeva dovoljni su strujni transformatori nazivne snage 30 VA.

Najjednostavniji način okidanja jest strujom iz strujnog transformatora pomoću mirnog kontakta (sl. 7.3). U normalnom pogonu sekundarna struja strujnog transformatora zatvara se kroz svitak releja (a) i mirnog kontakta (b). Svitak okidača sklopke (c) praktički nema struje radi relativno velike impedancije u usporedbi s kontaktom (b). Kad sekundarna struja postigne vrijednost na koju je udešen relej, otvara se kontakt releja i kroz svitak okidača protječe ukupna struja strujnog transformatora, što dovodi do isklapanja sklopke. Kontakt releja mora u ovom slučaju biti dimenzioniran tako da može izdržati i isklopiti vrlo velike struje kratkog spoja. Pomoćni kontakt (d na sl. 7.2) nije potreban, jer se isklapanjem sklopke prekida i struja u sekundarnom namotu strujnog transformatora.

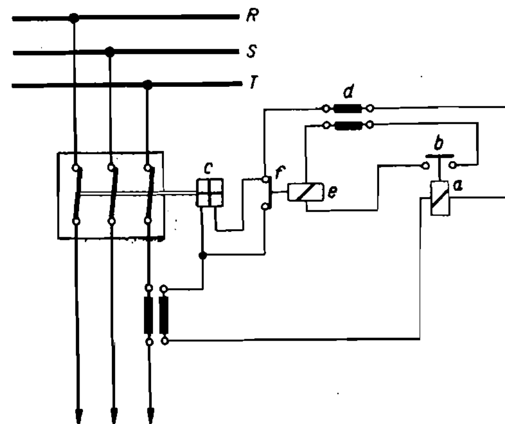
Da bi se izbjegla upotreba masivnih kontakata releja, što smanjuje i njegovu osjetljivost, izvodi se spoj za okidanje s radnim kontaktom i pomoćnim strujnim transformatorom (sl. 7.4). Tada sekundarna struja strujnog transformatora ne protječe preko kontakata releja (b) već samo kroz njegov svitak (a), koji će — kad struja postigne udešenu vrijednost



Slika 7.4. Primjer okidanja strujom iz strujnog transformatora s pomoćnim strujnim transformatorom; (a) relej, (b) radni kontakt, (c) okidač sklopke, (d) pomoćni strujni transformator

— zatvoriti radni kontakt releja (b). Tada se zatvara sekundarni krug pomoćnog strujnog transformatora (d), koji obično ima prijenosni omjer 5/1 A, a zasićen je već kod struja nešto većih od nazivne (mali strujni višekratnik), pa radi toga ni struje kroz kontakte releja ne postižu velike vrijednosti. Glavni je strujni transformator u normalnom pogonu nešto više opterećen, jer je pomoćni transformator tada otvoren na sekundarnoj strani pa djeluje kao prigušnica. Pomoćni strujni transformator mora biti tako izveden da može bez oštećenja ostati otvoren na sekundarnoj strani.

U slučaju upotrebe sheme spoja prikazane na sl. 7.4, a uz održanje malih struja na kontaktima releja, ne mogu se postići veće snage za okidanje. Kad je to potrebno, može se primijeniti shema spoja sa sl. 7.5. U normalnom pogonu sekundarna struja strujnog transformatora zatvara se preko svitka releja (a), primarnog namota pomoćnog strujnog transformatora (d) i mirnog kontakta pomoćnog releja (f). Mirnim kontaktom premošten je svitak okidača, dok je sekundarni krug pomoćnog strujnog transformatora otvoren. Kad struja u vodu postigne udešenu vrijednost, relej (a) zatvorit će radni kontakt (b) i na taj će se način zatvoriti i sekundarni krug pomoćnog strujnog transformatora, mirni će se kontakt pomoćnog releja otvoriti, pa će se strujni krug glavnog strujnog transformatora zatvoriti preko svitka okidača sklopke. Pomoćni strujni transformator (d) izveden je kao onaj prikazan na sl. 7.4. Na opisani način postiže se to da preko kontakta releja protječu male struje, ali da kroz svitak okidača protječu relativno velike struje.



Slika 7.5. Primjer okidanja strujom iz strujnog transformatora s pomoćnim strujnim transformatorom i pomoćnim relejem; (a) relej, (b) radni kontakt releja, (c) okidač sklopke, (d) pomoćni strujni transformator, (e) pomoćni relej, (f) mirni kontakt pomoćnog releja

C. Izbor vrste okidanja

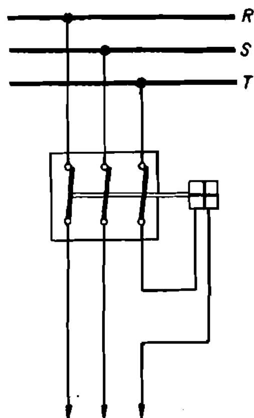
Najčešće se izvodi okidanje istosmjernom strujom. Ono se primjenjuje svagdje gdje već postoji, ili se mora postaviti, akumulatorska baterija za upravljanje i signalizaciju ili za rasvjetu iz nužde. Okidanje istosmjernom strujom pogonski je posve pouzdano, ali traži brižljiv nadzor nad akumulatorskom baterijom.

Okidanje strujom mjernih transformatora izvodi se obično samo u onim rasklopnim postrojenjima u kojima nema pomoćnog izvora struje. To su obično manja postrojenja bez posluge. Takvo okidanje ne zahtijeva nikakve pomoćne izvore struje s uređajem za nabijanje, pa prema tome niti poseban nadzor.

7.3. NADSTRUJNI RELEJI

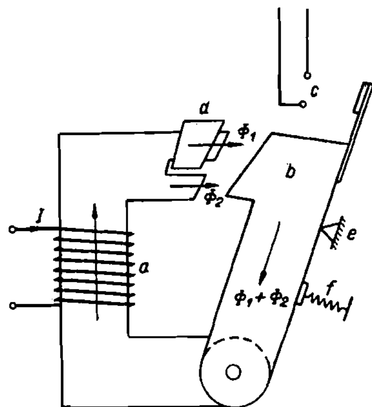
A. Upotreba i izvedbe

Nadstrujni relej zaštitni je uređaj, koji reagira na veličinu struje u štićenom dijelu mreže. On djeluje kad struja postigne ili prekorači udešenu vrijednost. Nadstrujni relej izvodi se kao primarni, kad kroz svitak protječe ukupna struja opterećenja, ili kao sekundarni relej, kad na njega djeluje sekundarna struja strujnog transformatora.



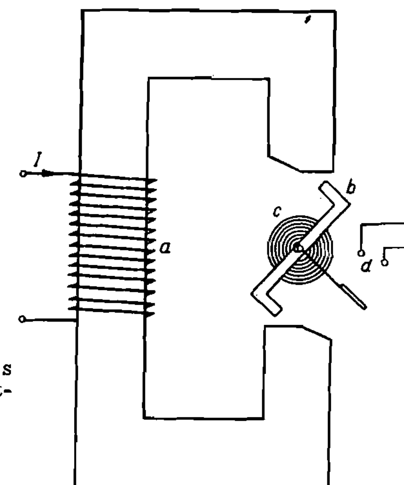
Slika 7.6. Priključak primarnog nadstrujnog releja

Primarni nadstrujni relej (sl. 7.6) nalazi se pod punim naponom dijela mreže koju štiti, pa je njegovo udešenje i pregled spojeno s prekidom pogona. Osim toga kroz namot primarnog releja protječe ukupna struja, pa je potrebno da namot bude dimenzioniran tako da bi mogao izdržati dinamička i termička naprezanja za vrijeme kratkog spoja. Zbog toga primarni releji moraju biti masivno izvedeni, što onemogućuje precizno djelovanje i udešenje. Primarni releji novije izvedbe mogu izdržati



Slika 7.7. Skica nadstrujnog releja s preklopnom kotvom: (a) svitak (b) preklopna kotva, (c) kontakti, (d) kratkospojni bakreni prsten, (e) graničnik, (f) pero čiju silu treba svladati relej

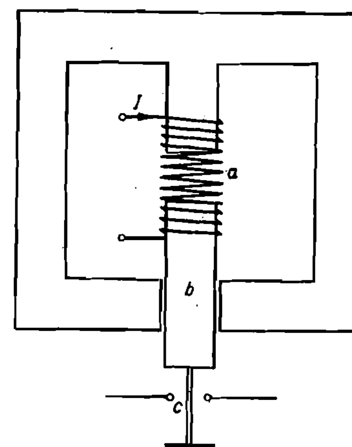
udarnu struju koja je i do 1000 puta veća, dok je granična termička struja (za vrijeme 1 sekunde) i do 250 puta veća od nazivne struje releja. Obje veličine ovise o konstrukciji i o fabrikatu, pa ih treba kontrolirati prema podacima iz tvorničkih lista. Primarni nadstrujni releji normalno



Slika 7.8. Skica nadstrujnog releja s okretnom kotvom; (a) svitak, (b) okretna kotva, (c) pero, (d) kontakti

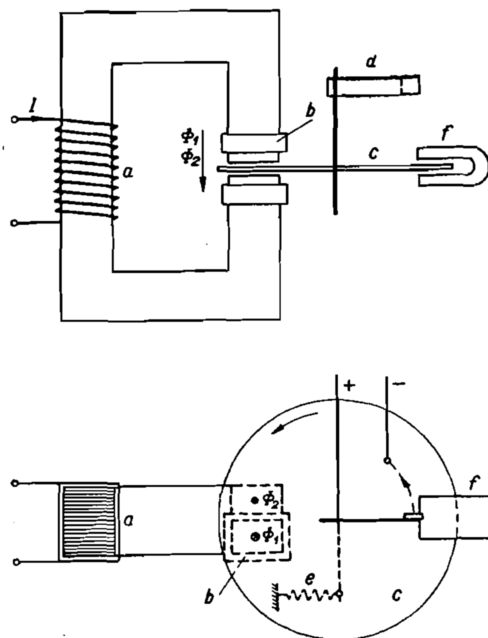
se montiraju na dovod sklopki, jer je svitak okidača ujedno i svitak releja.

Priključak sekundarnog nadstrujnog releja prikazan je na sl. 7.2. do 7.5.



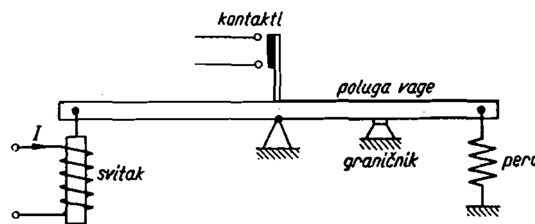
Slika 7.9. Skica nadstrujnog releja s uvlačnom kotvom; (a) svitak, (b) uvlačna kotva, (c) kontakti

Nadstrujni releji izvode se kao releji s preklopnom kotvom (sl. 7.7), kao releji s okretnom kotvom (sl. 7.8), zatim s uvlačnom kotvom (sl. 7.9) ili kao indukcioni releji (sl. 7.10). Kratkospojeni prsten releja s preklopnom kotvom (d na sl. 7.7) smanjuje titranje kotve. Kroz taj prsten,



Slika 7.10. Skica indukcionog nadstrujnog releja; (a) svitak, (b) kratko spojeni bakreni prsten, (c) aluminijska ploča, (d) kontakti, (e) pero, (f) magnetska kočnica

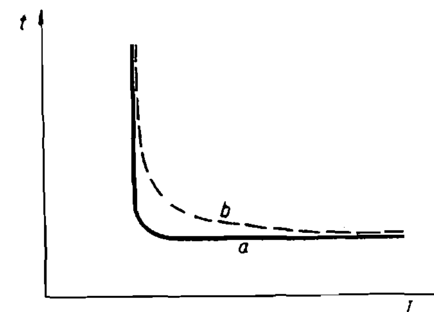
naime, zbog struje u njemu, protječe dok Φ_1, koji je u fazi pomaknut prema toku Φ_2, zbog čega se ukupni moment koji djeluje na kotvu mijenja u uskim granicama. Postojanje dvaju u fazi pomaknutih tokova u indukcionom releju (sl. 7.10) dovodi do znatnog momenta, kao posljedica međusobnog djelovanja toka Φ_1 i struje inducirane u aluminijskoj ploči od toka Φ_2, i međusobnog djelovanja toka Φ_2 te struje radi toka Φ_1. Moment, odnosno sila — da bi se zatvorili kontakti — treba da svlada silu pera (sl. 7.7, 7.8. i 7.10.) ili vlastitu težinu kotve (sl. 7.9).



Slika 7.11. Principijelni prikaz nadstrujnog releja

Promjenom broja zavoja svitka ili promjenom natezanja pera postiže se i promjena struje pri kojoj će se zatvoriti kontakti releja.

Nadstrujne releje možemo shematski prikazati vagom (sl. 7.11), jer se na taj način dobiva najbolja slika o djelovanju releja.



Slika 7.12. Vremenske karakteristike nadstrujnih releja; (a) karakteristika o struji neovisnog releja, (b) karakteristika o struji djelomično ovisnog releja

Trajanje djelovanja (od porasta struje do zatvaranja kontakata) releja s preklopnom, okretnom i uvlačnom kotvom praktički je neovisno o veličini struje, dok je trajanje djelovanja indukcionog releja djelomično ovisno o veličini struje (sl. 7.12). Kao element nadstrujne zaštite u mrežama u prvom se redu upotrebljavaju releji kojima je trajanje djelovanja neovisno o veličini struje (karakteristika a na sl. 7.12). Takve releje nazivamo neovisnim nadstrujnim relejima.

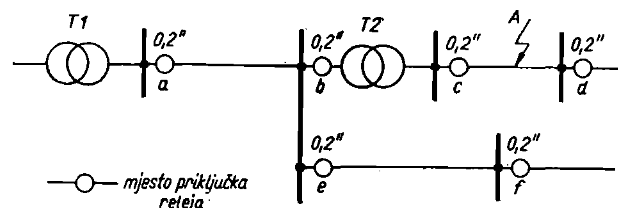
B. Neovisni nadstrujni releji

a) upotreba u radijalnoj mreži

Selektivnost zaštite nadstrujnim relejima ne može se postići ako se ne predvidi i vremensko stepenovanje nadstrujnih releja. Pod selektivnošću zaštite razumijevamo njezino svojstvo da isključi samo dijelove mreže koji su oštećeni ili koji ne mogu ostati u pogonu radi nastalog kvara. Ostali dijelovi mreže moraju ostati uklopljeni, kako bi samo najmanji mogući broj potrošača ostao bez energije.

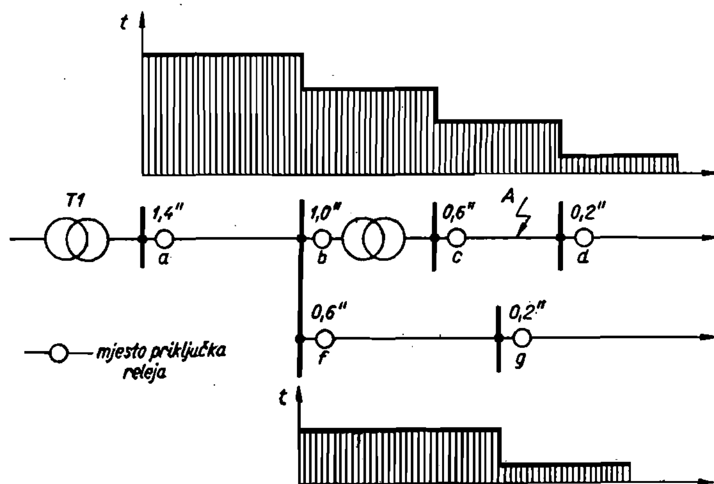
Promotrimo npr. radijalnu mrežu prikazanu na sl. 7.13. Neka na svim označenim mjestima postoje nadstrujni releji, te neka na mjestu A dođe do kratkog spoja. Kroz svitke releja a, b i c proteći će struja kratkog spoja, oni će proraditi i — teoretski — svi će istodobno izazvati isklapanje sklopaka na mjestima a, b i c nakon 0,2 s, koliko npr. — za upotrebljene releje i sklopke — iznosi vrijeme od nastanka kratkog spoja do isklapanja sklopke (vrijeme isklapanja). Prema tome — također teoretski — cijela mreža napajana preko transformatora T, ostat će bez napona. Praktički, međutim, ne može se ostvariti takva precizna izrada releja, pa će neki od njih djelovati brže, a neki sporije, što nije moguće unaprijed odrediti, te će isključiti jedan od tri spomenuta releja.

Poželjno je da impuls za isklapanje sklopke dade onaj relej koji je najbliži mjestu kvara (relej c na sl. 7.13), kako bi samo dio mreže desno od sabirnica pored tog releja ostao bez napona, dok bi ostali dio ostao u pogonu. To nije moguće sa sigurnošću postići pomoću releja čije vrijeme djelovanja nije stupnjevano.



Slika 7.13. Primjer mreže s vremenskim nestupnjevanim nadstrujnim relejima

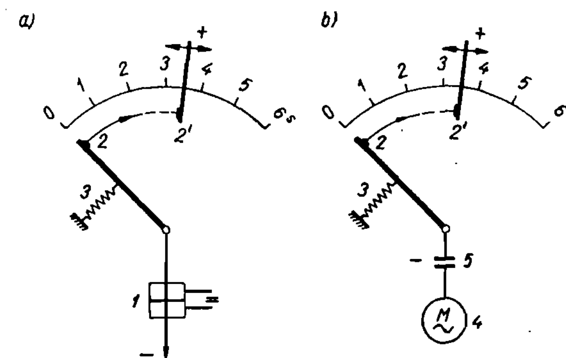
Nasuprot tome, selektivnost se može postići neovisnim nadstrujnim relejima, čija se vremena djelovanja mogu udesiti tako da djeluju na isklapanje sklopke nakon određenog vremena kako je radi primjera pokazano na sl. 7.14. Vremensko stupnjevanje provodi se na tom principu da se releji najudaljeniji od izvora energije udese na najkraće vrijeme isklapanja (0,2 s na sl. 7.14), slijedeći relej, idući prema izvoru energije,



Slika 7.14. Primjer mreže (sa sl. 7.13) s vremenskim stupnjevanim nadstrujnim relejima, dijagram ovisnosti vremena isklapanja o mjestu kratkog spoja

za vremenski stupanj dulje (0,4 s na sl. 7.14) itd. Vremenski stupanj ovisi o tačnosti releja. Takvim vremenskim stupnjevanjem postiže se to da će najprije djelovati relej koji je sa strane izvora energije najbliži mjestu

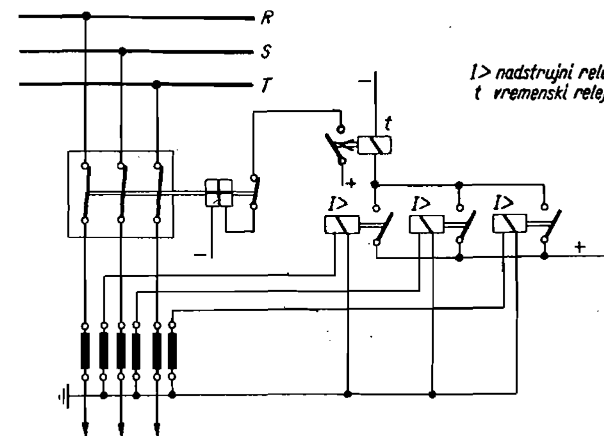
kvara, jer njegovo je vrijeme djelovanja najkraće. Naravno da će proraditi i ostali releji koji se nalaze u dijelovima mreže kroz koje protječe struja kratkog spoja (a i b na sl. 7.14), ali će isklopiti ona sklopka na koju djeluje relej najbliži mjestu kratkog spoja (c na sl. 7.14). Isklapanjem te sklopke prestat će teći struja kratkog spoja, pa će prestati i uzrok djelovanja ostalih releja, koji zbog toga neće ni doći do stanja da bi dali impuls za isklapanje sklopke.



Slika 7.15. Principijelna skica vremenskog releja: (a) sa satnim mehanizmom, (b) sa sinhronim motorom. (1) okidač, (2) i (2') kontakti, (3) pero za vraćanje u početni položaj, (4) sinhroni motor, (5) spojka

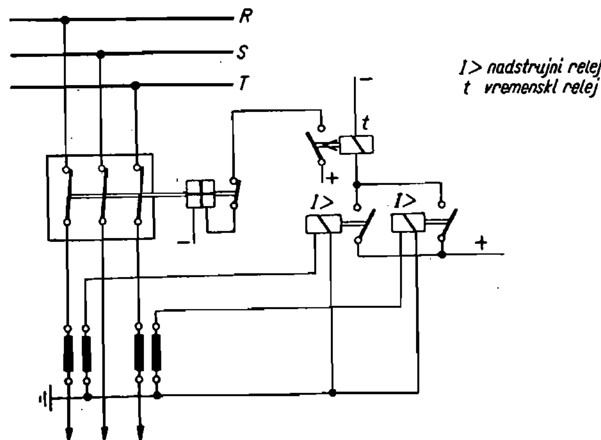
Da bi se omogućilo vremensko stupnjevanje, potrebno je uz nadstrujni, predvidjeti i vremenski relej. U toj je kombinaciji nadstrujni relej poticajni član, a vremenski usporni član.

Vremenski relej najčešće se izvodi (prema sl. 7.15a) sa satnim mehanizmom. Taj mehanizam se stavlja u pogon oslobađanjem zapora u oki-



Slika 7.16. Neovisna nadstrujna zaštita u tri faze

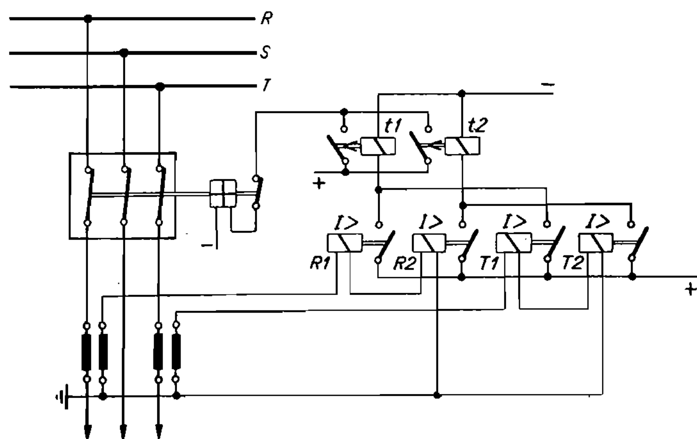
daču, koji konstantnom brzinom pokreće polugu s kontaktom 2, sve dok se ne zatvori strujni krug dodirom kontakata 2 i 2'. Pomakom kontakta 2' mijenja se i udešenje vremenskog releja. Satni mehanizam može biti izveden kao normalan sat na ručno navijanje, ili s perom koje se nategne djelovanjem okidača. U vremenskom releju (sl. 7.15b) sinhroni motor tjera polugu. Relej se stavlja u pogon spajanjem spojke. Sinhroni motor



Slika 7.17. Neovisna nadstrujna zaštita u dvije faze

napajan je preko zasićenog strujnog transformatora, kako bi se osigurao pogon i za vrijeme kratkog spoja u mreži.

U mrežama s neposredno uzemljenom nul-tačkom potrebno je u sve tri faze postaviti nadstrujnu zaštitu (sl. 7.16), dok su u mrežama s izoli-

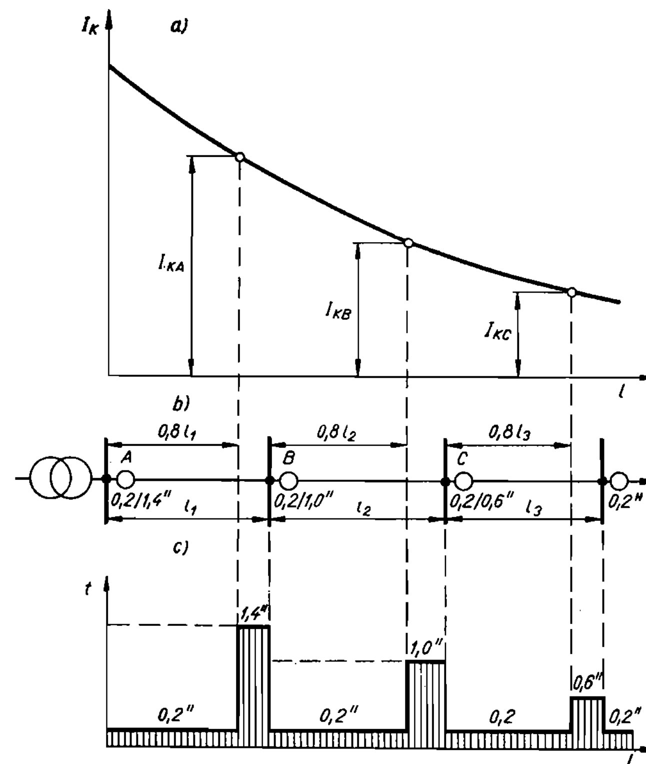


Slika 7.18. Neovisna nadstrujna zaštita s dva nadstrujna releja po fazi u dvije faze (R1 i T1 udešeni prema struji kratkog spoja, R2 i T2 prema struji opterećenja)

ranom nul-tačkom ili s uzemljenjem preko prigušnice dovoljni nadstrujni releji u dvije faze (sl. 7.17). U oba slučaja, međutim, dovoljan je samo jedan vremenski relej. U većini slučajeva izvode se svi releji u zajedničkom kućištu.

Glavni je nedostatak opisane kombinacije nadstrujnih i vremenskih releja u tome da baš za kratkih spojeva u blizini elektrana, kad su struje kratkog spoja najveće, vremena isklapanja postaju najdulja, što je nepovoljno radi termičkih naprezanja u tim dijelovima mreže.

Nadstrujne releje upotrebljene prema shemama na sl. 7.16. i 7.17. udešavamo prema struji opterećenja. Nadstrujni relej npr. djeluje pri 40% većoj struji od maksimalne u normalnom pogonu. Ako međutim za svaku sklopku u radijalnoj mreži upotrijebimo dva nadstrujna (za svaku fazu) i dva vremenska releja (sl. 7.18), može se postići skraćenje vremena za slučaj kratkog spoja na većem dijelu mreže. Da se postigne selektivnost, jedan od nadstrujnih releja (brzi nadstrujni relej) udesi se prema struji kratkog spoja, koristeći činjenicu da veličina te struje ovisi o mjestu kratkog spoja. Relej B u mreži na sl. 7.19b udešen je npr. tako da proradi kad struja postigne vrijednost I_{KB} (sl. 7.19a). Ta struja je



Slika 7.19. Vremensko stupnjevanje zaštite s po dva nadstrujna releja po fazi

tako odabrana da će relej B proraditi ako nastane kratki spoj između sabirnica i 80% duljine voda (0,8 l_2 na sl. 7.19b), jer će u tom slučaju struja iznositi više od I_{KB} ili biti upravo jednaka toj struji. Relej A, koji je ispred releja B, neće proraditi, jer on je udešen na veću struju. Vrijeme isklapanja za oba releja vrlo je kratko, npr. 0,2″. Odabrana je proradna struja, koja odgovara mjestu kratkog spoja udaljenom 80% duljine voda, jer releji ne rade bez pogreške. Kad bismo naime relej B udesili prema struji na kraju voda, u slučaju kvara neposredno iza releja C ne bismo bili sigurni hoće li proraditi releji B ili C. Takvim udešenjem releja dio voda (od 80% do 100% duljine) ostaje nezaštićen, jer nijedan od releja ne bi proradio u slučaju kvara na tom dijelu mreže. Da se ta mana ukloni, postavlja se drugi nadstrujni relej (R2 i T2 na sl. 7.18) koji je udešen prema struji opterećenja, i spojen s vremenskim relejem vremenski stupnjevanim kao pri upotrebi jednog nadstrujnog releja (sl. 7.14). Na taj se način smanjuje vrijeme isklapanja za 80% slučajeva kratkog spoja.

Ako je struja, npr. I_{KA}, određena za 80% duljine voda, a uz pretpostavku da je nastao tropolni kratki spoj, brzi nadstrujni relej djelovat će u slučaju dvopolnog kratkog spoja do 68,5% duljine voda $\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 80$ dok u slučaju jednopolnog kratkog spoja granična duljina do koje djeluje brzi nadstrujni relej ovisi o omjeru nulte i direktne reaktancije.

Opisana zaštita sa dva nadstrujna releja po fazi naročito je pogodna za zaštitu u mrežama srednjih napona s jednostranim napajanjem, u kojima je struja kratkog spoja znatno veća od struje opterećenja, a napon na mjestu napajanja mijenja se unutar uskih granica.

b) Upotreba u dvostrano napajanoj mreži

Kad je mreža napajana sa dvije strane, ne može se opisanom nadstrujnom zaštitom postići selektivno djelovanje, jer struje kratkog spoja dotječu sa dvije strane, pa takvo vremensko stupnjevanje nije jednoznačno definirano. Zbog toga se u dvostrano napajanim mrežama uz nadstrujni relej upotrebljava i usmjereni, da bi se pored veličine struje uzeo u obzir i smjer energije.

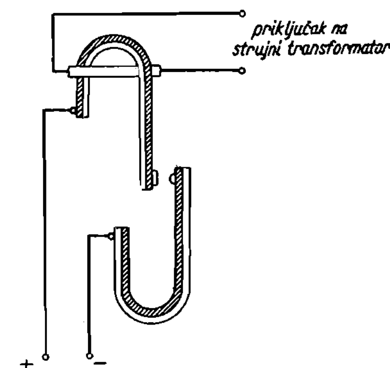
U upotrebi nadstrujnih releja u dvostrano napajanoj mreži bit će više govora u poglavlju o usmjerenim relejima.

C. Ovisni nadstrujni releji

Nadstrujni ovisni releji rade na indukcionom (sl. 7.10) i termičkom principu.

Poželjan oblik vremenske karakteristike (sl. 7.12) indukcionog releja postiže se njegovom pogodnom konstrukcijom (izbor zasićenja jezgre, zračnog raspora i sl.).

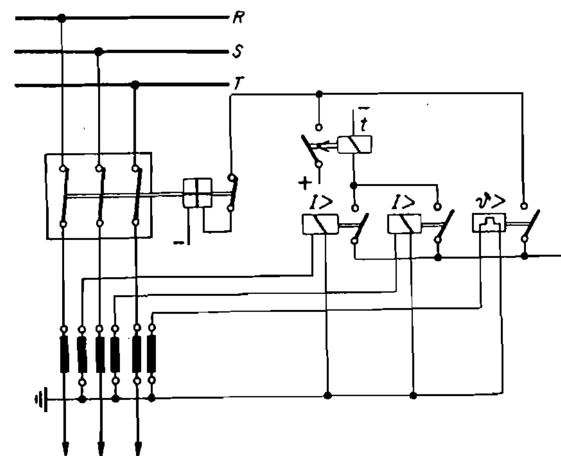
Među nadstrujne releje možemo ubrojiti i one koji rade na termičkom principu, jer njihovo je djelovanje ovisno o veličini struje, odnosno tačnije o ugrijavanju radi prolaza struje. Oni se obično izvode za priključak na strujne transformatore, a mogu se — osim za zaštitu motora, ispravljača i sl. — upotrijebiti i za zaštitu transformatora i generatora od preopterećenja, da bi se bolje iskoristili štićeni strojevi. Termički releji načinjeni su od bimetalne trake, kojoj se obično dodaje i drugi bimetalni dio (sl. 7:20) koji nije grijan strujom, a zadatak mu je da kom-



Slika 7.20. Skica termičkog releja

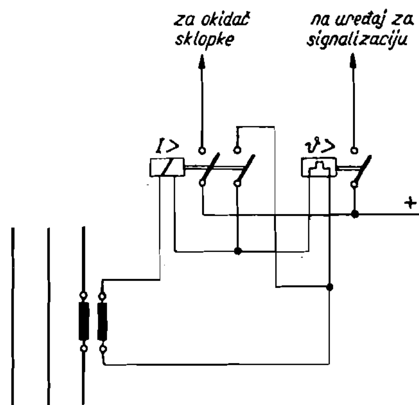
penzira utjecaj temperature okoline na grijani dio. Radi grijanja strujom povisivat će se temperatura bimetala, koji se sastoji od dvije različite metalne trake navaljane ili zavarene jedna na drugu, a koje imaju različite koeficijente rastezanja pri ugrijavanju. Zbog povišenja temperature grijana bimetalna traka se deformira, pa će na određenoj temperaturi doći do zatvaranja kontakta.

Principijelno bi termički relej trebao biti izveden tako da njegova vremenska konstanta bude jednaka vremenskoj konstanti štićenog objekta.



Slika 7.21. Neovisna nadstrujna zaštita (u dvije faze) s termičkom zaštitom (u jednoj fazi)

Takav termički relej, koji bi bio termička slika štićenog objekta, može se, međutim, izvesti samo uz relativno visoke troškove. Neke tvornice proizvode termičke releje pomoću kojih se nastoji dobiti što vjernija termička slika transformatora, uvodeći u relej utjecaj temperature okoline i temperature ulja transformatora.



Slika 7.22. Kombinacija nadstrujnog releja i termičkog releja u istoj fazi

Termički releji izvode se ili posebno ili u kombinaciji s neovisnim nadstrujnim relejom. Posebno izvedeni termički relej najčešće se upotrebljava kao zaštita u kombinaciji s nadstrujnim relejima, pa se tada u dvije faze postavljaju neovisni nadstrujni releji, kao zaštita od kratkog spoja, a u treću fazu termički relej, kao zaštita od preopterećenja (sl. 7.21). Ako se u istoj fazi upotrijebe i nadstrujni i termički relej, obično nadstrujni relej bez vremenskog zatezanja djeluje na isklapanje, a termički na signalizaciju (sl. 7.22). Djelovanjem nadstrujnog releja zatvara se kontakt kojim se premoštava termički relej, da bi ga se zaštitilo od preopterećenja za vrijeme trajanja kratkog spoja.

7.4. USMJERENI RELEJI

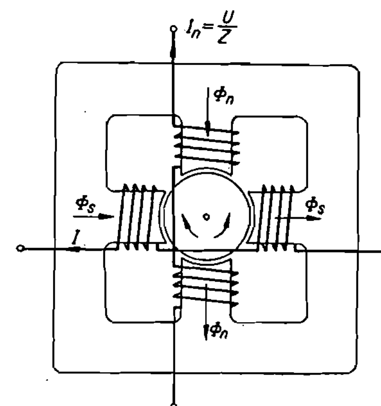
A. Izvedbe i djelovanje

Usmjereni releji, kojih je zadatak da utvrde smjer energije u štićenom dijelu mreže, mogu se izvesti kao indukcioni releji sa dva svitka (strujni i naponski), koji rade na istom principu kao brojila. Noviji releji, međutim, izvode se također kao indukcioni, ali s cilindričkim rotorom od bakra ili aluminija unutar kojeg je jezgra od željeznih limova, da bi se smanjio magnetski otpor (sl. 7.23). Tok jednog para polova proporcionalan je struji I, a tok drugog para polova naponu U. Kroz naponski svitak protječe struja I_n, koja zaostaje za naponom za kut ψ_n. Proizvedeni

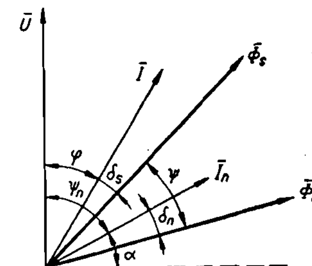
tokovi, zbog gubitaka, zaostaju za strujama koje ih proizvode za kut δ_s, odnosno za kut δ_n (sl. 7.24). Zakretni moment iznosi

$$M = k\,\Phi_s\,\Phi_n \sin\psi \qquad \ldots (7.1)$$

Ako pretpostavimo da je $\delta_s = \delta_n$, a budući da su tokovi proporcionalni struji I, odnosno naponu U, može se napisati



Slika 7.23. Indukcioni relej s cilindričnim rotorom



Slika 7.24. Napon, struje i tokovi u indukcionom releju s cilindričnim rotorom

$$M = k_1\,I\,U \sin(\psi_n - \varphi) \qquad \ldots (7.2)$$

Osim toga može se (sl. 7.24) postaviti da je

$$\psi_n = 90^0 - \alpha \qquad \ldots (7.3)$$

pa je

$$M = k_1\,I\,U \cos(\varphi + \alpha) \qquad \ldots (7.4)$$

Zakretni moment proporcionalan je dakle djelatnoj snazi, kao da struja zaostaje (ili prethodi) za kut $\varphi + \alpha$ za naponom. Treba konstatirati kako usmjereni releji i ne treba da mjeri pravu snagu, već samo da konstatira njezin smjer. Osim toga usmjereni relej treba da djeluje za vrijeme kratkog spoja kad je $\varphi \cong 90^0$, i kad bi zakretni moment bio malen ako bi α (7.4) bio jednak nuli. Radi toga je povoljno da α bude između 30^0 i 60^0. Promjenom smjera energije promijenit će se predznak struje, pa će i moment promijeniti predznak, što je dovoljno da bi usmjereni relej djelovao.

Usmjereni relej može se ostvariti usporedbom struje i napona. Pođimo od izraza za snagu prema (7.4)

$$P = I\,U \cos(\varphi + \alpha) \qquad \ldots (7.5)$$

Ako desnoj strani dodamo

$$\left|\left(\frac{U}{2}\right)^2 + \left(\frac{I}{2}\right)^2\right| - \left|\left(\frac{U}{2}\right)^2 + \left(\frac{I}{2}\right)^2\right| \qquad \ldots (7.6)$$

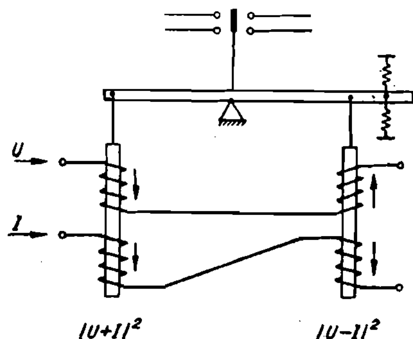
dobit ćemo

$$P = \left| \left(\frac{U}{2} \right)^2 + \frac{U\,I \cos(\varphi + \alpha)}{2} + \left(\frac{I}{2} \right)^2 \right| - \left| \left(\frac{U}{2} \right)^2 - \frac{U\,I \cos(\varphi + \alpha)}{2} + \left(\frac{I}{2} \right)^2 \right| \quad \ldots (7.7)$$

odakle je

$$P = \left| \frac{\mathbf{U}}{2} + \frac{\mathbf{I}}{2} \right|^2 - \left| \frac{\mathbf{U}}{2} - \frac{\mathbf{I}}{2} \right|^2 \quad \ldots (7.8)$$

Da bi se relacija (7.8) iskoristila kao indikacija o smjeru energije u usmjerenom releju, može se upotrijebiti vaga sa četiri svitka, spojena kao na sl. 7.25. Djelovanje vage prema (7.8) osniva se na činjenici da je sila



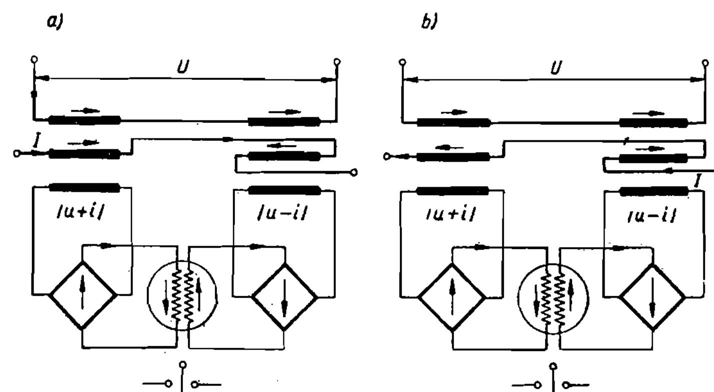
Slika 7.25. Principijelni prikaz izvedbe usmjerenog releja pomoću vage

proporcionalna kvadratu toka, dok je tok proporcionalan naponu, odnosno struji. Ako je za naznačeni smjer struje

$$\left| \frac{\mathbf{U}}{2} + \frac{\mathbf{I}}{2} \right|^2 > \left| \frac{\mathbf{U}}{2} - \frac{\mathbf{I}}{2} \right|^2$$

(sl. 7.25), pretegnut će lijevi krak vage, pa će se zatvoriti lijevi kontakti. Ako se međutim promijeni smjer struje (smjer energije), zatvorit će se desni kontakti.

To se može postići usporedbom ispravljenih struja prema spoju na sl. 7.26a. U pomoćnim strujnim transformatorima vrši se zbrajanje, odnosno oduzimanje, pa se suma, odnosno diferencija, pojavljuje u trećim namotima. Nakon ispravljanja dovode se i suma i razlika u istosmjerni relej, čiji zakret zavisi od toga da li je veća apsolutna vrijednost sume ili razlike. Treba naglasiti da strujni transformator vrši geometrijsko zbrajanje, odnosno odbijanje, dok istosmjerni relej — jer se radi o ispravljenim strujama gdje nemaju nikakve uloge ni frekvencija ni fazni pomak — reagira samo na aritmetičku razliku apsolutnih vrijednosti sume $|\mathbf{U} + \mathbf{I}|$ i razlike $|\mathbf{U} - \mathbf{I}|$. Da se na to ukaže, na sl. 7.27. prikazana je

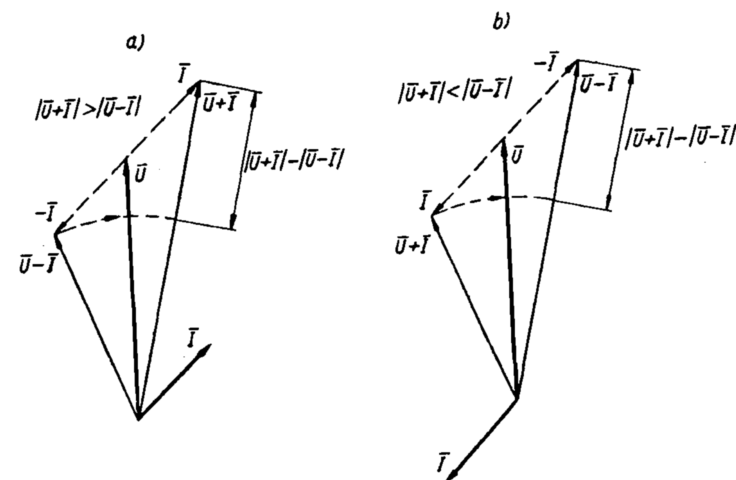


Slika 7.26. Principijelni prikaz izvedbe i priključak usmjerenog releja s usporedbom ispravljenih struja (u b promijenjen smjer struje prema a)

geometrijska suma $|\mathbf{U} + \mathbf{I}|$ i razlika $|\mathbf{U} - \mathbf{I}|$ za dva različita smjera energije. U prvom slučaju je $|\mathbf{U} + \mathbf{I}| > |\mathbf{U} - \mathbf{I}|$ (sl. 7.27a), a u drugom $|\mathbf{U} + \mathbf{I}| < |\mathbf{U} - \mathbf{I}|$. Drugom slučaju odgovara sl. 7.26b. Zakretni moment istosmjernog releja možemo dakle prikazati relacijom

$$M = k\,(|u + i| - |u - i|) \quad \ldots (7.9)$$

gdje su u ispravljena vrijednost struje proporcionalne naponu U, a i ispravljena vrijednost struje proporcionalne struji I.



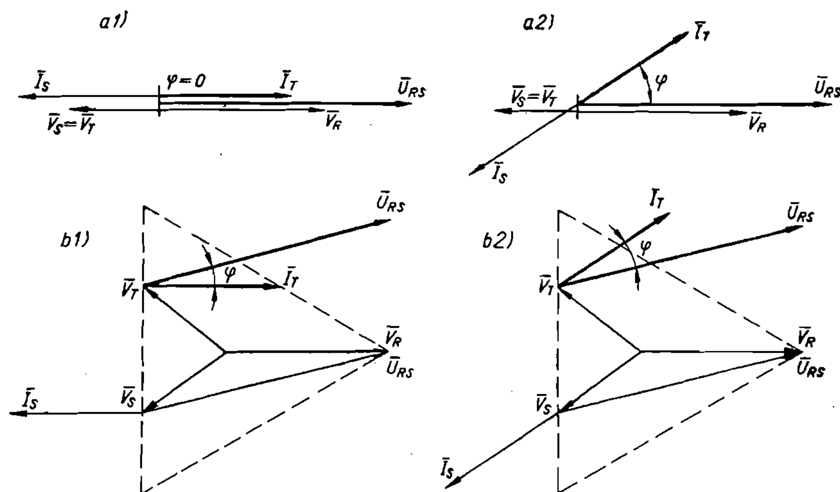
Slika 7.27. Naponi, struje, njihova suma i diferencija koje djeluju u usmjerenom releju s usporedbom ispravljenih struja (u b promijenjen smjer struje prema a)

B. Priključak usmjerenog releja

Usmjereni relej treba, kako je već spomenuto, da djeluje za vrijeme kratkog spoja i da samo registrira smjer energije. Da bi relej sigurno radio, zakretni moment mora biti dovoljno velik, kako bi zaštita pouzdano djelovala. Kako nije potrebno da usmjereni relej mjeri pravu snagu, sigurnost djelovanja može se postići pogodnim spojem. Jedan je od uvjeta, što je već naglašeno, da fazni pomak $(\alpha + \varphi)$ između napona i struje ne bude 90^0, jer bi tada (7.4) zakretni moment bio jednak nuli. To vrijedi i za releje s vagom (sl. 7.25) i za releje s usporedbom ispravljenih struja (sl. 7.26). Ako, naime, fazni pomak između napona i struje iznosi 90^0, apsolutna vrijednost sume $(\mathbf{U} + \mathbf{I})$ bit će jednaka apsolutnoj vrijednosti razlike $(\mathbf{U} - \mathbf{I})$, pa će i P (7.8) i M (7.9) biti jednaki nuli. To se može vidjeti i u dijagramu na sl. 7.27. Nadalje, da bi zaštita pouzdano djelovala, povoljno je da se fazni pomak znatnije razlikuje od 90^0.

Osim toga, u izrazima za zakretni moment dolazi i napon koji za vrijeme kratkog spoja može postati nula, ako se relej nalazi u neposrednoj blizini mjesta kratkog spoja. No u tom slučaju neće djelovati usmjereni relej, jer neće postojati zakretni moment. To vrijedi za sve opisane izvedbe usmjerenih releja. Zbog toga naponske svitke releja treba priključiti na napon koji će osigurati funkcioniranje releja i u neposrednoj blizini mjesta kratkog spoja.

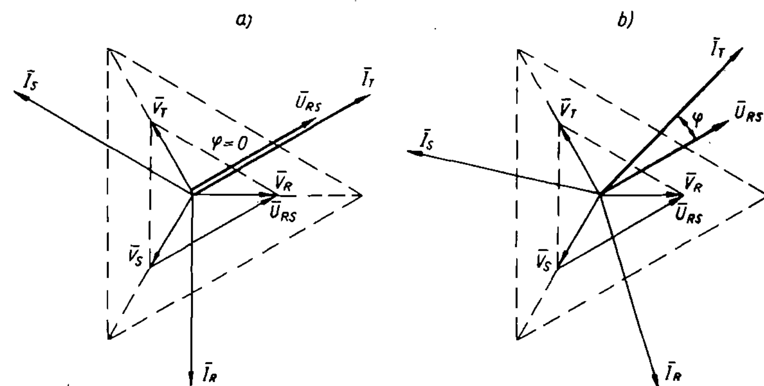
Ako promatramo napone na mjestu tropolnog kratkog spoja (neposredni metalni kratki spoj), možemo konstatirati da su svi naponi, i linijski i fazni, jednaki nuli, pa nema nikakve mogućnosti da usmjereni relej djeluje ako se nalazi u neposrednoj blizini mjesta kratkog spoja. Udaljavajući se od mjesta kratkog spoja napon postaje veći, a relej će moći



Slika 7.28. Struje i naponi dvopolnog kratkog spoja za kratki spoj između faza S i T; (a1) i (a2) na mjestu kratkog spoja, (b1) i (b2) na mjestu udaljenom od kratkog spoja, (a1) i (b1) uz zanemarenje djelatnog otpora

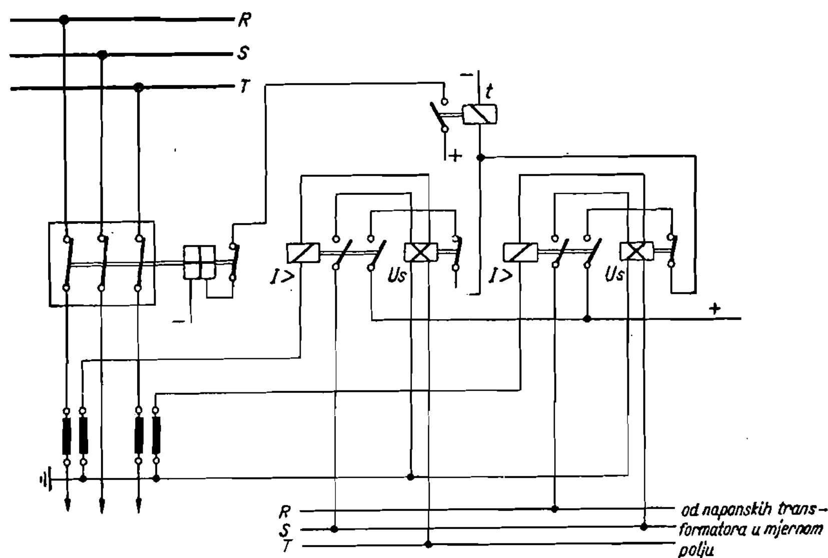
djelovati kad zakretni moment definiran relacijama (7.4) ili (7.9) postane veći od proradnog momenta releja, koji je potreban da se relej pokrene. U okolini releja postoji dakle »mrtva zona«; ako, naime, unutar mrtve zone nastane tropolni kratki spoj, relej neće reagirati radi preniske vrijednosti napona.

Za dvopolni kratki spoj mrtva zona ne postoji, ako naponski svitak releja priključimo na linijski napon koji zaostaje 90^0 za faznim naponom one faze, na koju je priključen strujni svitak (isto onako kako se priključuje varmetar, što je opisano u poglavlju 6.2). To znači na isti usmjereni relej djeluju alternativno: struja $\mathbf{I}_R$ i napon $\mathbf{U}_{ST}$, struja $\mathbf{I}_S$ i napon $\mathbf{U}_{TR}$, odnosno struja $\mathbf{I}_T$ i napon $\mathbf{U}_{RS}$. U slučaju kratkog spoja među fazama S i T, na sl. 7.28. prikazan je međusobni položaj struje $\mathbf{I}_T$ i napona $\mathbf{U}_{RS}$ koji djeluju na usmjereni relej. Analogno bismo dobili za dvopolne kratke spojeve između R i S, te R i T. Za slučaj tropolnog kratkog spoja udaljenog od mjesta priključka releja, struje i naponi prikazani su na sl. 7.29. Za usmjereni relej na koji djeluju struja $\mathbf{I}_T$ i napon $\mathbf{U}_{RS}$ imamo također osigurano djelovanje.



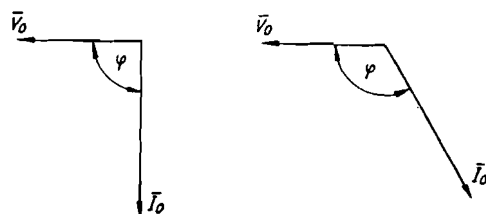
Slika 7.29 Struje i naponi tropolnog kratkog spoja na mjestu udaljenom od kratkog spoja; (a) uz zanemarenje djelatnog otpora, (b) uzevši u obzir i djelatni otpor

Za mreže koje imaju izoliranu nul-tačku (ili nul-tačku priključenu preko prigušnice) dovoljno je postaviti dva usmjerena releja (sl. 7.30). Da bi se ostvarila neovisna nadstrujna zaštita s usmjerenjem, potrebni su nadstrujni releji ($I >$ na sl. 7.30), usmjereni relej (Us) i vremenski relej (t). Kad dođe do kratkog spoja u mreži, najprije će proraditi nadstrujni relej i uklopiti naponski svitak usmjerenog releja, koji će — ako je smjer energije takav da zaštita treba da djeluje — zadržati zatvoren mirni kontakt, što će omogućiti zatvaranje istosmjernog kruga preko kontakata nadstrujnog i usmjerenog releja za uzbudu svitka vremenskog releja. Zatvaranjem kontakta vremenskog releja isklapa se sklopka. Ako je međutim smjer energije suprotan, otvorit će se mirni kontakt usmjerenog releja, pa do uzbude svitka vremenskog releja neće ni doći i pored toga što je djelovao nadstrujni relej. Obično se, što nije radi pojednostavnjenja



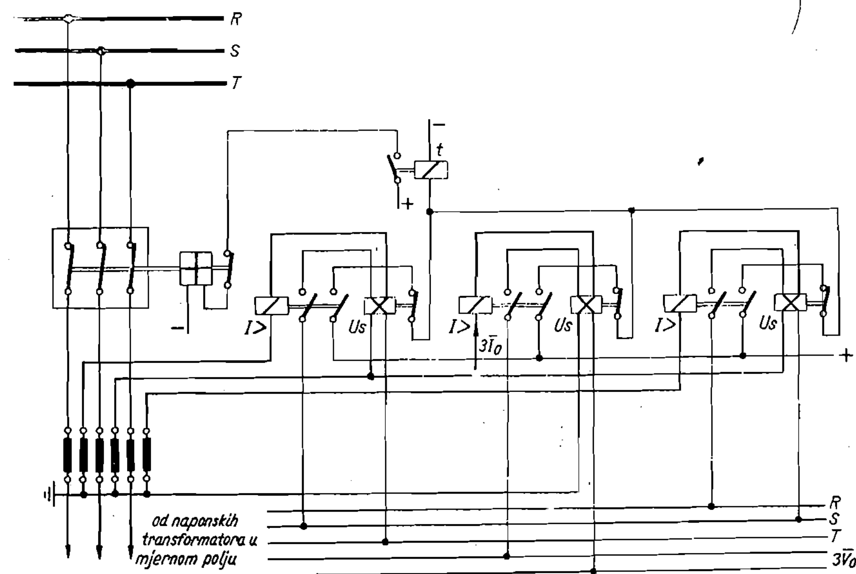
Slika 7.30. Zaštita s neovisnim nadstrujnim i usmjerenim relejima za mrežu s izoliranom ili uzemljenom nul-tačkom preko prigušnice

prikazano na sl. 7.30, djelovanje usmjerenog releja prenosi preko pomoćnog releja, čiji se svitak uzbuđuje preko konktakta usmjerenog releja, a tek pomoćni relej uključuje kontakte za zatvaranje strujnog kruga za uzbudu vremenskog svitka. To se izvodi zato da bi se usmjereni relej mogao načiniti što preciznije.

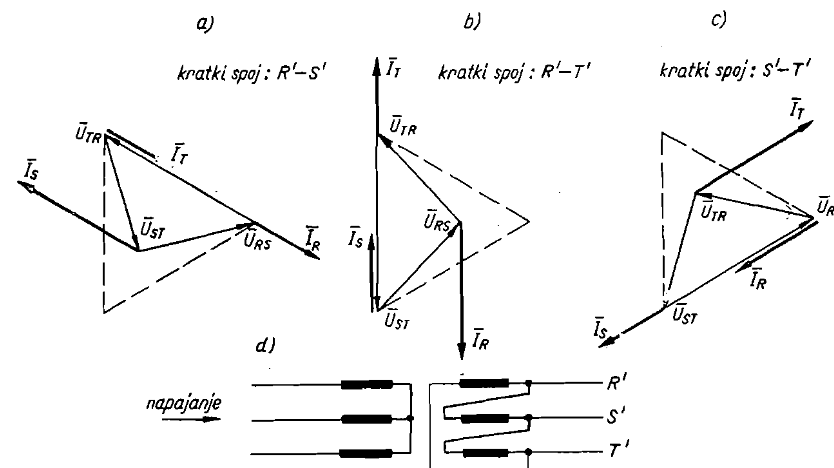


Slika 7.31. Struja i napon nultog sistema za jednopolni kratki spoj i dvopolni kratki spoj uz istodobni spoj sa zemljom; (a) uz zanemarenje djelatnog otpora, (b) uzevši u obzir djelatni otpor

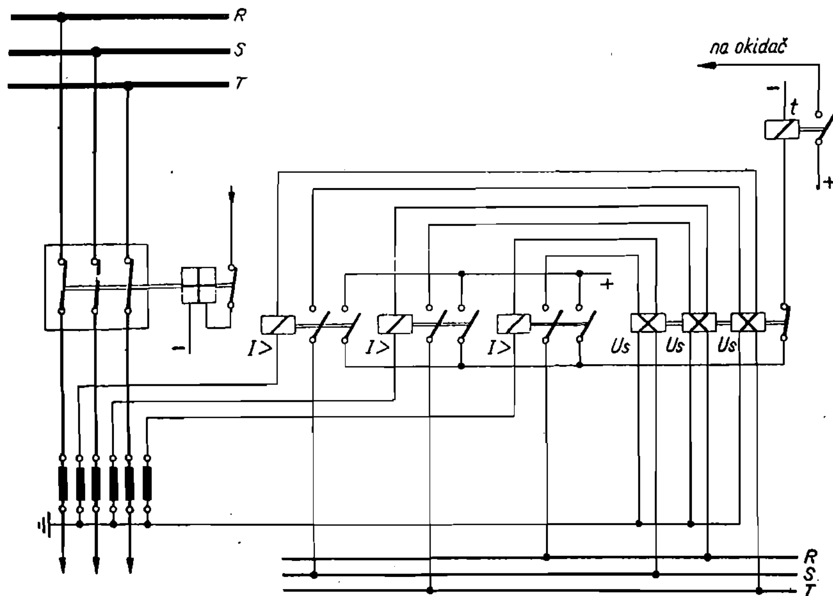
U kruto uzemljenim mrežama potreban je još jedan relej, da bi se obuhvatili i jednopolni kratki spojevi. Kroz strujni svitak tog trećeg releja protječe nulta komponenta struje (tačnije: trostruka nulta komponenta, jer dobivena je kao zbroj struja triju faza), a kroz naponski svitak nulta komponenta napona (odnosno njezina trostruka vrijednost). Međusobni položaj struje I_0 i napona V_0 prikazan je na sl. 7.31. U svim sluča-



Slika 7.32. Zaštita s neovisnim nadstrujnim i usmjerenim relejima za mrežu s neposredno uzemljenom nul-tačkom (jedan usmjereni relej priključen na nultu struju i nulti napon)



Slika 7.33. Struje i naponi na strani zvijezde transformatora u spoju zvijezda-trokut za slučaj kratkog spoja na strani trokuta (zanemareni djelatni otpori)

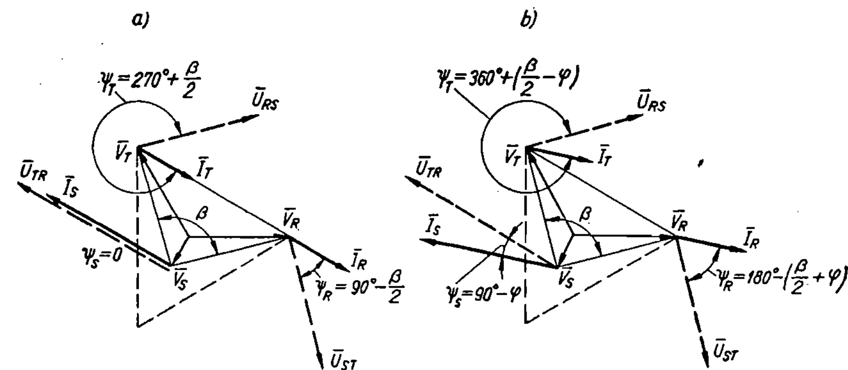


Slika 7.34. Zaštita s tri neovisna nadstrujna i usmjerena releja, koja reagira i na kratki spoj na sekundarnoj strani transformatora zvijezda-trokut

jevima postoji djelatni otpor, pa je osiguran zakretni moment. Na sl. 7.32. prikazana je shema spoja zaštite sa tri usmjerena releja, od kojih je srednji priključen na nultu struju i nulti napon. I kroz nadstrujni relej, koji služi kao poticajni član za taj usmjereni relej, protječe nulta komponenta struje. Napon nultog sistema dobiva se spajanjem u otvoreni trokut tercijarnih namotâ sloga naponskih transformatora.

Poteškoće se pojavljuju u vezi s ispravnim pokazivanjem smjera energije, ako se unutar mreže koja je obuhvaćena usmjerenom zaštitom nalazi transformacija zvijezda-trokut, radi koje dolazi do pojave struja koje ne odgovaraju strujama kratkog spoja na onoj strani transformatora, na kojoj je nastao kratki spoj (detaljnije o tomu bit će govora u poglavlju o diferencijalnoj zaštiti transformatora). Tako se pri transformatoru prikazanom na sl. 7.33d u slučaju dvopolnog kratkog spoja na strani trokuta na primarnoj strani pojavljuju struje ucrtane u dijagramima na sl. 7.33a do 7.33c. Postavljanjem dvaju usmjerenih releja ne može se osigurati ispravno djelovanje zaštite, pa se radi toga postavljaju tri usmjerena releja, koji zajednički djeluju na isti kontakt. Usmjereni releji spojeni su na struje u fazama $\mathbf{I}_R$, $\mathbf{I}_S$ i $\mathbf{I}_T$, te na napone $\mathbf{U}_{ST}$, $\mathbf{U}_{TR}$ i $\mathbf{U}_{RS}$.

Na sl. 7.34. prikazana je shema spoja takve zaštite. Iz dijagrama na sl. 7.35. može se odrediti zbroj momenata koji djeluje na kontakt triju mehanički spojenih usmjerenih releja. Prikazane su prilike za dvopolni kratki spoj među fazama R′—S′ (sl. 7.33). Moment je proporcionalan snazi koja je određena relacijom



Slika 7.35. Struje i naponi za slučaj dvopolnog kratkog spoja među fazama R′ i S′ (sl. 7.33) s kutevima između struja i napona za određivanje zakretnih momenata; (a) uz zanemarenje djelatnih otpora, (b) uzevši u obzir djelatne otpore

$$P = I_R U_{ST} \cos\left[360^0 + \left(\frac{\beta}{2} - \varphi\right)\right] + I_S U_{TR} \cos(90^0 - \varphi) + + I_T U_{RS} \cos\left[180^0 - \left(\frac{\beta}{2} + \varphi\right)\right] \quad \ldots (7.10)$$

Možemo postaviti da su $U_{ST} = U_{RS} = U$, $U_{TR} = 2\,U \sin\frac{\beta}{2}$, $I_R = I_T = I$ i $I_S = 2I$, pa je

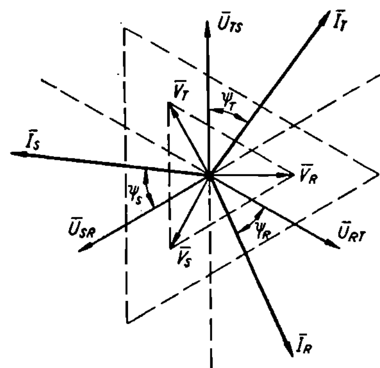
$$P = 6\,IU \sin\varphi \sin\frac{\beta}{2} \quad \ldots (7.11)$$

Kut β kreće se između 60^0 i 180^0, i kut φ između 0^0 i 90^0, pa je snaga P uvijek pozitivna, što osigurava ispravno djelovanje releja. Analogno razmatranje moglo bi se provesti za dvopolni kratki spoj među ostalim fazama.

Treba spomenuti da bismo iste prilike kao na sl. 7.33. imali kad bismo razmatrali struje na strani trokuta, uz pretpostavku da kratak spoj nastaje na strani zvijezde, ako se napaja sa strane trokuta.

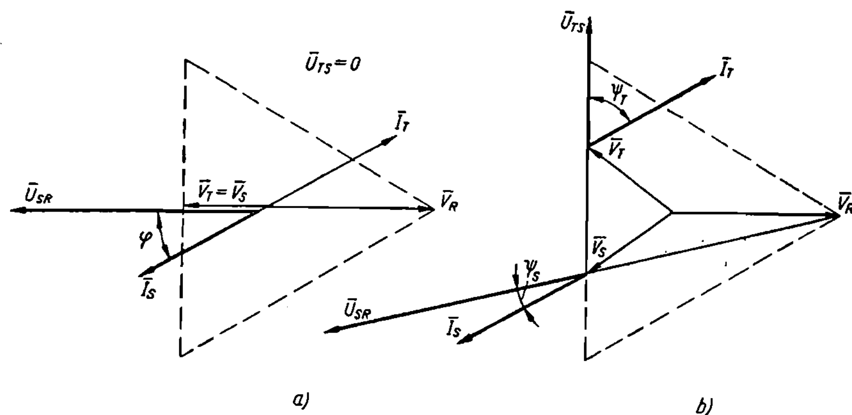
Dosada prikazane spojeve nazivamo spojevima sa zakretom od 90^0, jer se sa faznom strujom kombinira linijski napon zakrenut za 90^0 prema pripadnom faznom naponu. Izvode se međutim usmjereni releji sa zakretom od 30^0, pa se takvom releju kroz koji protječe struja $\mathbf{I}_R$ narine linijski napon $\mathbf{U}_{RT}$, uz struju $\mathbf{I}_S$ napon $\mathbf{U}_{SR}$, a uz struju $\mathbf{I}_T$ napon $\mathbf{U}_{TS}$. (sl. 7.36). U spoju sa zakretom od 30^0 može se ostvariti zaštita bez »mrtve zone« pri dvopolnom kratkom spoju sa tri mehanički povezana usmjerena releja (kao na sl. 7.34). U slučaju naime kratkog spoja među fazama S i T u neposrednoj blizini releja, kad bi postojali usmjereni releji samo u fazama R i T, zakretni moment releja u fazi T bio bi jednak nuli, jer tada je $U_{TS} = 0$ (sl. 7.37a). Nasuprot tome relej u fazi S, priključen na

napon U_{SR}, imao bi znatan napon, što omogućuje djelovanje usmjerenog releja. Analogno dobivamo i za kratke spojeve među ostalim fazama. Određivanjem snage koja je proporcionalna zakretnom momentu prema sl. 7.36. i 7.37. može se konstatirati da je i za tropolni i za dvopolni kratki spoj jednoznačno određen smjer energije.

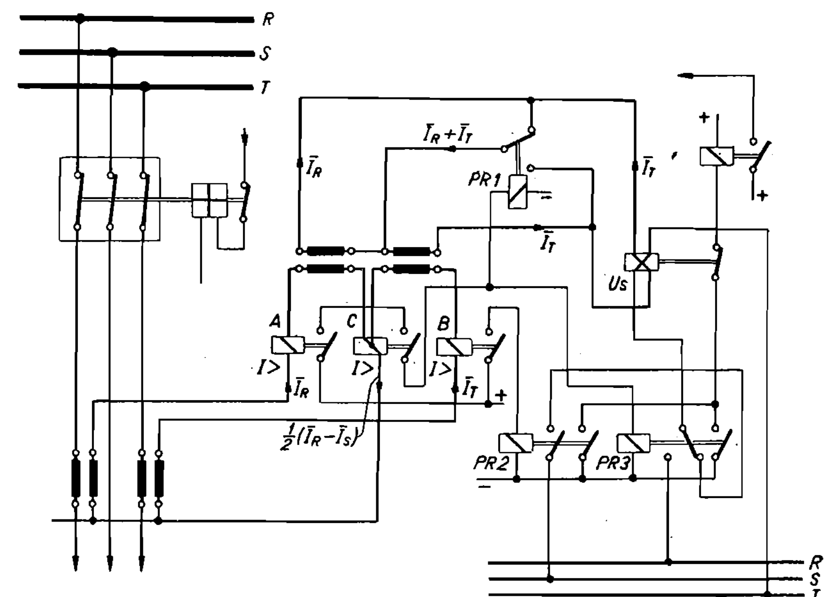


Slika 7.36. Struje i naponi u slučaju tropolnog kratkog spoja za usmjerene releje spojene sa zakretom od 30°

Upotrebom spoja sa zakretom od 30° može se ostvariti zaštita (sl. 7.38), koja ispravno djeluje i u slučaju kratkog spoja u galvanski povezanoj mreži i u mreži u kojoj struje kratkog spoja prolaze kroz transformator u spoju zvijezda-trokut. Prikazana zaštita ima tri nadstrujna releja; kroz dva (A i B na sl. 7.38) protječu struje faza (npr. I_R i I_T), a kroz treći (relej C) polovina razlike između jedne od tih struja i struje u trećoj fazi. Na shemi sa sl. 7.38. spoj je izveden tako da kroz treći relej protječe struja $\frac{1}{2}(\mathbf{I}_R - \mathbf{I}_S)$. Svitak trećeg releja spojen je tako da kroz sve zavoje



Slika 7.37. Struje i naponi u slučaju dvopolnog kratkog spoja za usmjerene releje spojene sa zakretom od 30°



Slika 7.38. Zaštita s neovisnim nadstrujnim i jednim usmjerenim relejem u spoju sa zakretom od 30° koja reagira na neposredni kratki spoj i kratki spoj na drugoj strani transformatora u spoju zvijezda-trokut

protječe struja $\mathbf{I}_R$, a samo kroz polovinu zavoja struja $\mathbf{I}_T$, pa relej djeluje tako da kroz njega protječe struja

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_R + \frac{1}{2}\,\mathbf{I}_T \qquad \dots (7.12)$$

Budući da se radi o mreži s izoliranom nul-tačkom, struja $\mathbf{I}_T$ iznosi

$$\mathbf{I}_T = -(\mathbf{I}_R + \mathbf{I}_S) \qquad \dots (7.13)$$

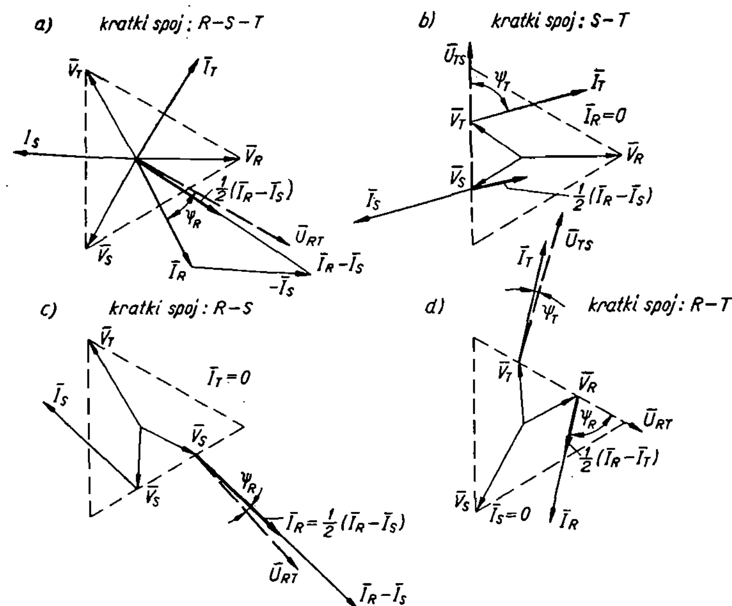
pa je

$$\mathbf{I} = \frac{1}{2}\,(\mathbf{I}_R - \mathbf{I}_S) \qquad \dots (7.14)$$

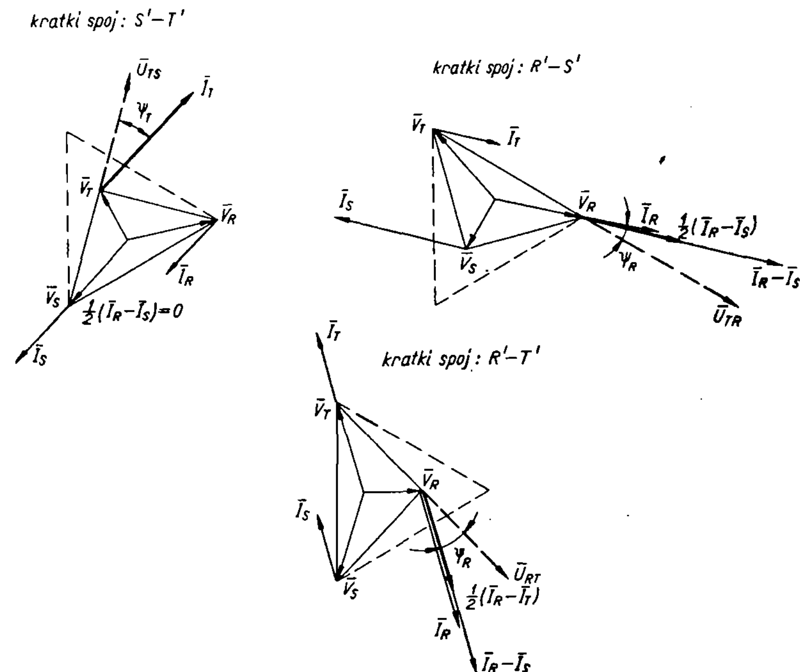
Struje $\mathbf{I}_R$ i $\mathbf{I}_T$ transformiraju se preko pomoćnih strujnih transformatora i dovode u strujni svitak usmjerenog releja. U sekundarnom krugu pomoćnih strujnih transformatora postoji preklopni kontakt upravljan pomoćnim relejom PR1, koji preklapa kad prorade releji A i C. U naponskim krugovima postoje dva pomoćna releja, od kojih jedan (PR 3) uklapa kontakte kad prorade nadstrujni releji A i C, a drugi (PR 2) kad proradi nadstrujni relej B. Treba napomenuti da je na naponski svitak narinut — već prema položaju kontakata — ili napon $\mathbf{U}_{TS}$ ili napon $\mathbf{U}_{TR}$. Obrnuti smjer napona $\mathbf{U}_{TR}$ odabran je radi toga što struja $\mathbf{I}_R$ ima smjer obrnut

struji I_T. Pretpostavljat ćemo da u vektorskim diagramima struje imaju isti smjer, pa će se i odnosi prikazivati s naponom U_{RT}. U neuzbuđenom stanju preklopkom pomoćnog releja (PR 1) premošten je pomoćni strujni transformator kroz koji protječe struja I_R, pa kroz usmjereni relej protječe struja I_T, dok je jedan kraj naponskog svitka stalno priključen na napon faze T.

Promotrimo najprije prilike u slučaju kratkog spoja u mreži u kojoj između mjesta kratkog spoja i releja nema transformacije zvijezda–trokut ili uopće nema transformacije (galvanski spojena mreža). Ako nastane tropolni kratki spoj, kroz relej će poteći struje prikazane na sl. 7.39a. Reagirat će sva tri nadstrujna i sva tri pomoćna releja, pa će zbog toga kroz usmjereni relej poteći struja $-I_R$, a na njega će djelovati napon U_{TR}. U slučaju dvopolnog kratkog spoja među fazama S—T (sl. 7.39b) neće reagirati nadstrujni relej A (struja $I_R = 0$), pa prema tome ni PR 1 i PR 3, bez obzira na to da li je struja $\frac{1}{2}(I_R - I_T)$ kroz relej B dovoljna da bi taj relej proradio. Zbog toga će kroz usmjereni relej teći struja I_T i na njega djelovati napon U_{TS}, koji će biti uključen preko preklopnog kontakta pomoćnog releja PR 3 i radnog kontakta releja PR 2. Pri dvopolnom kratkom spoju među fazama R i S (sl. 3.39c) proradit će nadstrujni releji A i C, jer je $I_T = 0$, pa će se uzbuditi pomoćni releji PR 1 i PR 3. Na usmjereni relej djeluju struja $-I_R$ i napon U_{TR}. Pri dvopolnom kratkom spoju među fazama R—T (sl. 7.39d) sigurno će



Slika 7.39. Struje i naponi u releju na sl. 7.38. za tropolni i dvopolne kratke spojeve u galvanski spojenoj mreži



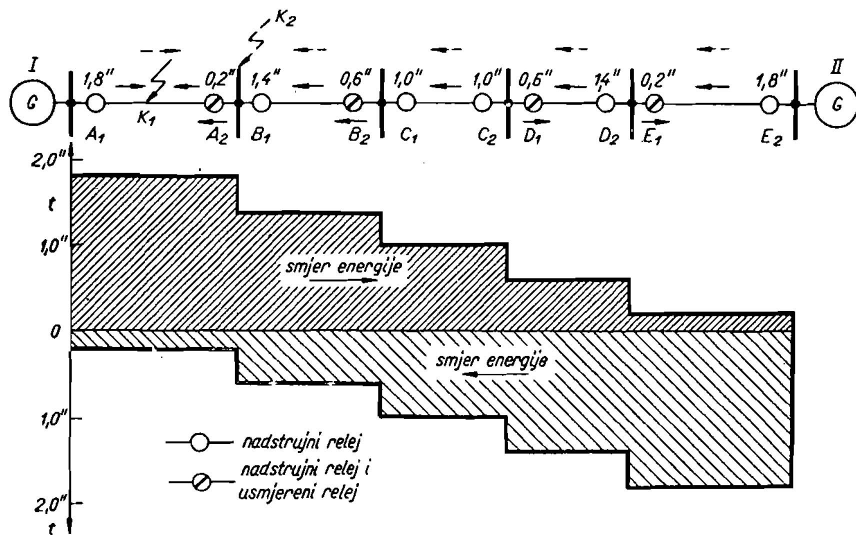
Slika 7.40. Struje i naponi u releju na sl. 7.38. za dvopolne kratke spojeve na sekundarnoj strani transformatora u spoju zvijezda-trokut (oznake prema sl. 7.33)

proraditi nadstrujni releji A i B, pa će na usmjereni relej djelovati struja I_T i napon U_{TS}. Ako međutim — što ovisi o veličini struje i udešenju releja — proradi i relej C, na usmjereni relej djelovat će — I_R i U_{TR}.

Ako se između mjesta kratkog spoja i releja nalazi transformator u spoju zvijezda-trokut, te ako nastane kratki spoj među fazama S' i T' (sl. 7.33), kroz relej C neće biti struje (sl. 7.40a), pa će na usmjereni relej djelovati struja I_T i U_{TS}. Pri kratkim spojevima među fazama R' i S' (sl. 7.40b), te fazama R' i T' (sl. 7.40c) proradit će sva tri nadstrujna releja (A, B i C), pa će kroz usmjereni relej proteći struja $-I_R$ i na njega djelovati napon U_{TR}.

C. Upotreba usmjerenih releja

Kao što je pokazano na sl. 7.14, s jedne strane napajani jednostruki vodovi mogu se selektivno zaštititi nadstrujnim neovisnim relejima. Samo nadstrujnim relejima, međutim, nemoguće je ostvariti selektivnu zaštitu u mreži koja je napajana sa dvije strane, a sastoji se od jednostrukih vodova (sl. 7.41). U takvoj mreži valja upotrijebiti nadstrujne s usmjerenim relejima. Usmjereni releji treba da omoguće isklapanje sklopaka

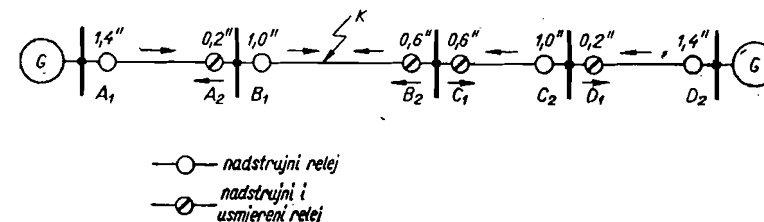


Slika 7.41. Primjer vremenskog stupnjevanja zaštite dvostrano napajane mreže s nadstrujnim i usmjerenim relejima (neparni broj vodova)

samo kad energija ima smjer od sabirnica prema vodu u kojem se nalazi relej. Vremensko stupnjevanje treba provesti za releje na krajevima vodova prema generatoru I (releji A_1, B_1, C_1, D_1 i E_1 na sl. 7.41), kao da postoji samo taj generator (prema principima stupnjevanja nadstrujne zaštite bez usmjerenog releja), dok stupnjevanje releja na krajevima prema generatoru II (releji A_2, B_2, C_2, D_2 i E_2) treba provesti kao da postoji samo generator II. Na taj način dobivamo tzv protuhodno vremenski stupnjevanu zaštitu. Da se osigura selektivnost, usmjereni releji se postavljaju na krajevima vodova, promatrano od strane dvaju generatora. Ako se pođe od vodova najbližih generatorima (releji A_2 i E_1 na sl. 7.41), pa sve dalje od generatora (releji B_2 i D_1), doći će se do voda koji je jednako (po broju vodova) udaljen od oba generatora, a na kojemu bi oba releja trebala da budu usmjereni releji (C_1 i C_2), sa suprotnim smjerom djelovanja. Selektivnost se međutim može ostvariti i s običnim nadstrujnim relejima, što je i jeftinije, pa se u srednjem vodu postavljaju takvi releji.

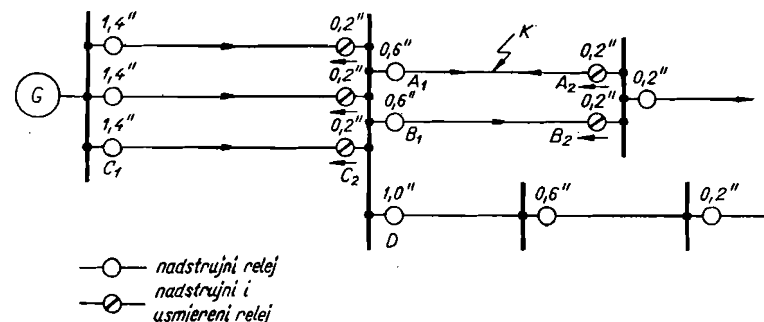
Ako tada dođe do kratkog spoja u K_1, svi će nadstrujni releji u mreži proraditi, usmjereni releji A_2 i B_2 položajem kontakata omogućit će isklapanje sklopaka, a komandu za isklapanje dat će usmjereni relej A_2 nakon 0,2″ i nadstrujni relej A_1 nakon 1,8″. Svi ostali releji prestat će raditi nakon djelovanje releja A_2, jer kroz njih više neće protjecati struja kratkog spoja. Na taj će način biti isključen samo vod na kojemu je nastao kvar. U slučaju kratkog spoja na sabirnicama (K_2 na sl. 7.41) djelovat će releji na počecima vodova koji napajaju oštećene sabirnice (releji A_1 i B_2), što je s obzirom na selektivnost ispravno, jer ni vodovi nemaju nikakve važnosti kad su sabirnice na koje su priključeni u kratkom spoju. Ako se pojavi kratak spoj u srednjem vodu (između

releja C_1 i C_2), proradit će samo nadstrujni releji u cijeloj mreži, a komandu za isklapanje dat će samo releji u tom vodu (C_1 i C_2), jer im je vrijeme djelovanja najkraće.



Slika 7.42. Primjer vremenskog stupnjevanja zaštite dvostrano napajane mreže s nadstrujnim i usmjerenim relejima (parni broj vodova)

Naravno da se srednji vod može pojaviti samo onda ako postoji neparan broj vodova između generatora. Postavljanje releja karakterizirano je tada sa dva nadstrujna releja isto vremenski udešena na krajevima srednjeg voda. Ako međutim postoji paran broj vodova (sl. 7.42), postupamo i s obzirom na vremensko stupnjevanje i s obzirom na položaj usmjerenih releja kao u mreži s neparnim brojem vodova. Kao karakteristiku smještaja releja u mreži s parnim brojem vodova dobivamo dva usmjerena releja istih vremena, ali suprotna smjera djelovanja (releji B_2 i C_1 na sl. 7.42) s obje strane srednjih sabirnica mreže.



Slika 7.43. Primjer zaštite jednostrano napajane mreže s dvostrukim i višestrukim vodovima

U mreži sa sl. 7.43. i pored toga što se napajanje vrši samo s jedne strane, nije dovoljna tek obična nadstrujna zaštita, radi postojanja dvostrukih i višestrukih vodova. Da bi se osiguralo isklapanje samo oštećenog voda, potrebno je na krajeve vodova (gledano od strane generatora) postaviti usmjerene releje. Vrijeme djelovanja tih usmjerenih releja treba da bude najkraće što je moguće (0,2″ u primjeru sa sl. 7.43). Pri kratkom spoju u K djelovat će releji na kraju oštećenog voda (A_1 i A_2). Nadstrujni relej (B_1 na sl. 7.43) na početku voda, koji je paralelan s oštećenim vodom, neće djelovati, jer će relej A_2 prije proraditi. Releji C_1

Slika 7.44. Primjer zaštite u prsten spojene mreže s jednom napojnom tačkom (neparni broj vodova)

udešeni su na 1,4", da bi se osigurala selektivnost prema releju D na radijalnoj mreži, iako bi prema relejima A_1 i B_1 bilo dovoljno trajanje djelovanja od 1,0". Kao karakteristiku postavljanja releja u paralelnim vodovima treba spomenuti da se u sve međusobno paralelne vodove postavljaju jednaki releji (A_1 i B_1, te A_2 i B_2 na sl. 7.43), te da se na krajevima paralelno spojenih vodova — ako se nalaze u mreži koja je napajana samo s jedne strane — vremena djelovanja usmjerenih vodova udešavaju na najkraće moguće vrijeme (A_2, B_2 i C_2), bez obzira na to gdje se paralelni vodovi nalaze u mreži.

Mrežu spojenu u prsten, a napajanu samo iz jedne tačke, treba s obzirom na nadstrujnu i usmjerenu zaštitu tretirati kao mrežu, napajanu

Slika 7.45. Primjer zaštite u prsten spojene mreže s jednom napojnom tačkom (parni broj vodova)

sa dvije strane (sl. 7.41. i 7.42). Vremensko stupnjevanje i smještaj usmjerenih releja isti je u mreži spojenoj u prsten (sl. 7.44. i 7.45) kao i u otvorenoj mreži. I opet se pojavljuju već spomenute karakteristike za mrežu s neparnim brojem vodova (sl. 7.44) i za onu s parnim (sl. 7.45).

Slika 7.46. Mreža spojena u prsten s napajanjem s dvije strane. Releji označeni sa zvijezdicom ne djeluju sigurno selektivno

U mrežama spojenim u prsten, koje se napajaju u dvije i više tačaka, nije moguće ostvariti selektivnu zaštitu pomoću nadstrujnih i usmjerenih releja. Kao primjer za to neka posluži mreža sa sl. 7.46. Vremensko stupnjevanje i smještaj usmjerenih releja isti su kao u dosada prikazanim mrežama. Promotrimo sada kako bi zaštita djelovala u slučaju kratkih spojeva K_1 i K_2. U prvom slučaju, kad je kratki spoj dovoljno blizu sabirnica generatora, djelovao bi relej B pored relejâ A i C, ukoliko je struja u grani u kojoj nije došlo do kratkog spoja veća od proradne struje releja, što ovisi o snazi generatorâ i o mjestu kratkog spoja. Ako dođe do kratkog spoja u K_2, struja u neoštećenoj grani imat će suprotan smjer, pa će — uz već spomenuti uvjet — proraditi relej D, pored relejâ E i F. Analogno za kratke spojeve na drugom vodu može se konstatirati da bi mogli proraditi releji A i E. Djelovanje releja B i D, odnosno A i E, u tim slučajevima nije poželjno, jer na taj način dolazi do razdvajanja generatora, iako je kvar nastao samo u jednoj grani. Naravno da bi do sličnih situacija došlo u mrežama spojenim u prsten, a napajanim u tri i više tačaka.

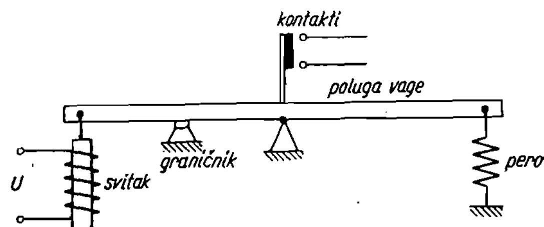
7.5. NAPONSKI RELEJI

A. Izvedba

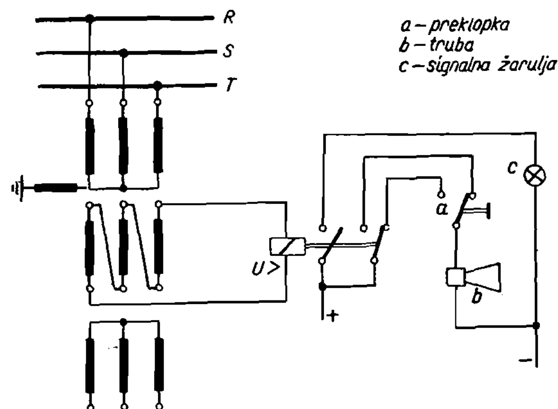
Naponski releji izvode se isto kao i strujni, s tom razlikom što se svitak releja priključuje na napon čija promjena treba da djeluje na relej.

Naponski releji izvode se kao podnaponski ili nadnaponski. Prvi djeluju kad su udešena vrijednost postigne ili podbaci, a drugi kad se ta vrijednost postigne ili prekorači.

U podnaponskom releju je kotva elektromagneta u normalnom pogonu privučena, jer njegov je svitak trajno priključen na napon koji treba



Slika 7.47. Principijelni prikaz podnaponskog releja



Slika 7.47a. Shema spoja za javljanje zemnog spoja pomoću nadnaponskog releja

kontrolirati. Kad napon padne na udešenu proradnu vrijednost, ili ispod nje, pero prevladava silu kotve, što dovodi do zatvaranja kontakta (sl. 7.47).

Nadnaponski releji djeluju isto kao nadstrujni.

B. Upotreba naponskih releja

Naponski releji upotrebljavaju se u rasklopnim postrojenjima za javljanje zemnog spoja. Osim toga podnaponski releji upotrebljavaju se za zaštitu motora, a nadnaponski za zaštitu nekih generatora. Razmatrat ćemo samo upotrebu nadnaponskih releja za javljanje zemnog spoja, jer ostale primjene izlaze iz okvira visokonaponskih rasklopnih postrojenja.

Zemnim spojem nazivamo posredni ili neposredni spoj jednog vodiča sa zemljom ili uzemljenim vodljivim dijelovima voda ili postrojenja. Do zemnog spoja može doći samo u mrežama koje nemaju neposredno uzemljenu nul-tačku.

Za javljanje nastanka zemnog spoja mogu se upotrijebiti slijedeće pojave:

a) smanjenje napona između vodiča na kojem se pojavio zemni spoj i zemlje, jer dozemni napon toga vodiča postaje manji od faznog napona, dok pri neposrednom zemnom spoju taj napon postaje jednak nuli;

b) povišenje napona između zdravih vodiča i zemlje, jer dozemni naponi zdravih vodiča postaju veći od faznog napona, a u slučaju neposrednog zemnog spoja naponi između zdravih vodiča i zemlje postaju jednaki linijskom naponu;

c) pojavljivanje napona između zvjezdišta i zemlje, jer geometrijski zbroj napona triju faza prema zemlji nije više jednak nuli. Taj napon nazivamo naponom zvjezdišta.

Najjednostavnije pokazuju nastanak zemnog spoja tri voltmetra koji mjere fazne napone; oni u normalnom pogonu imaju iste otklone, dok u slučaju zemnog spoja nastaje razlika u pokazivanju (prema a i b). Takav način obično se ne smatra dovoljnim, jer se zemni spoj može zapaziti samo promatranjem instrumenata, a nema uređaja koji bi upozorio osoblje (koje ne mora stalno promatrati instrumente) da je došlo do promjene pokazivanja voltmetra. Radi toga se upotrebljava nadnaponski relej (sl. 7.47a), koji je priključen na tercijarni namot sloga triju jednopolnih naponskih transformatora, između čijih priključnica vlada napon zvjezdišta. Kad se pojavi napon među stezaljkama tercijarnog namota zatvorit će radni kontakt i preklopiti preklopni kontakt, preko kojih se uklapaju signalna žarulja (c) i truba (b). Truba će upozoriti osoblje da se pojavio zemni spoj u mreži. Uklopničar će preklopkom (a) obustaviti rad trube, ali će žarulja dalje svijetliti kao znak da i dalje postoji zemni spoj. Ako zemni spoj iščezne, relej će svoje kontakte povratiti u početni položaj i tim će ponovno aktivirati trubu. Uklopničar će na to upozorenje prebaciti preklopku (a) u početni položaj i time uspostaviti početno stanje, a uređaj će biti sposoban da registrira nov zemni spoj, kad se pojavi. Prema tome i početak i kraj zemnog spoja bit će javljeni trubom.

7.6. DISTANTNI RELEJI

A. Princip rada distantnog releja

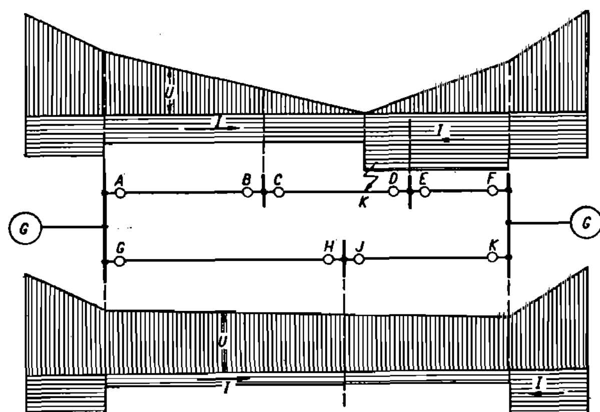
Zbog dugog vremena djelovanja nadstrujnih i usmjerenih releja, i njihove nemogućnosti selektivnog djelovanja već u nešto kompliciranijoj mreži, upotrebljava se distantna zaštita. To je zaštita, čije vrijeme djelovanja raste s udaljenošću kratkog spoja od releja. Ako, dakle, releji koji su najbliži mjestu kratkog spoja djeluju nakon najkraćeg vremena, bit će osigurano selektivno djelovanje zaštite u mreži bilo kakve konfiguracije.

Da prikažemo princip djelovanja distantne zaštite poslužimo se mrežom sa sl. 7.48, te pretpostavimo da je nastao kratki spoj K. Najkraće vrijeme djelovanja treba da imaju najbliži releji (C i D). Takav odnos vremenâ djelovanja treba da postoji za bilo koje mjesto kvara. To se može postići upotrebom releja koji mjeri omjer između napona i struje

na mjestu gdje je postavljen relej. Omjer napona i struje predstavlja veličinu impedancije

$$Z = \frac{U}{I} \qquad \ldots (7.15)$$

između mjesta kvara i mjesta gdje je priključen relej. Ako usporedimo veličinu Z (7.15) s dijagramima na sl. 7.48, lako ćemo konstatirati da će omjer U/I biti to veći, što se više udaljujemo od mjesta kratkog spoja. Naročito veliku vrijednost ima Z u paralelnom zdravom vodu, jer je napon U visok, a struja I relativno malena. Ako se vrijeme djelovanja releja postavi u ovisnost o impedanciji Z (manja impedancija, kraće vrijeme djelovanja), dobit će se selektivna zaštita i u višestruko učvorenoj mreži. Malo detaljnijim razmatranjem prilika u mreži sa sl. 7.48. opazit ćemo, međutim, da postoje releji koji se praktički nalaze na istom mjestu u mreži. To su releji u različitim vodovima, ali postavljeni uz iste sabir-

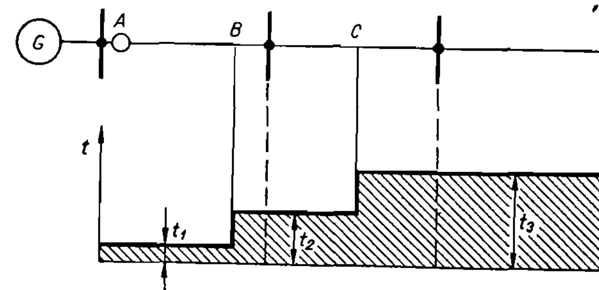


Slika 7.48. Struje u vodovima i naponi uzduž vodova za kratki spoj K u dvostrano napajanoj mreži

nice (npr. releji B i C, D i E itd.). Oni bi, prema ranije izloženom, imali isto vrijeme djelovanja, pa ne bi postojala selektivnost djelovanja. Da se to postigne releji moraju djelovati i kao usmjereni, pa oni omogućuju isklapanje sklopke samo kad energija ima smjer od sabirnica prema vodu.

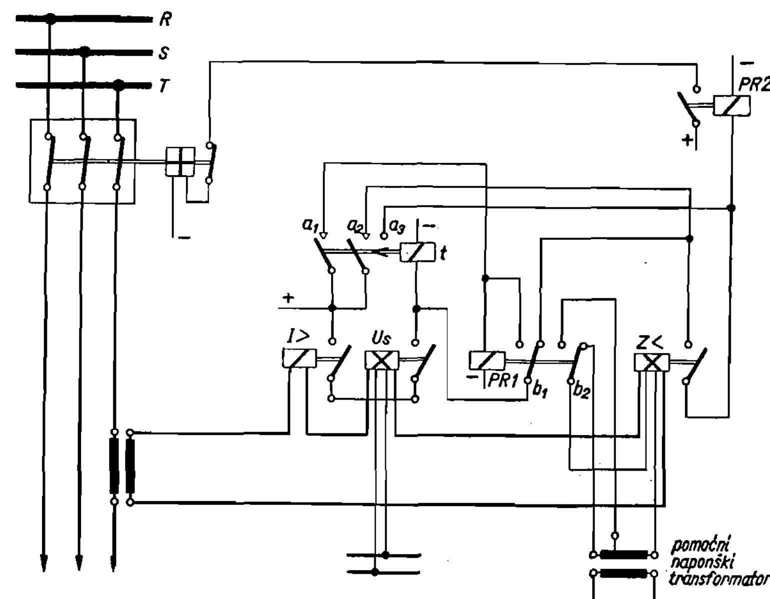
Da se ostvari opisana zaštita, potrebna su četiri elementa: a) poticajni član, koji će svojim djelovanjem konstatirati da je nastao kvar u mreži, b) mjerni član (distantni relej u užem smislu), koji će izmjeriti impedanciju Z i na taj način utvrditi udaljenost mjesta kvara od releja, c) usmjereni član, kojeg je zadatak da ustanovi smjer energije, pa ili dopusti ili spriječi djelovanje zaštite i d) vremenski član, kojim se određuje vrijeme djelovanja zaštite. Na sl. 7.49. prikazan je primjer vremenskog stepenovanja distantne zaštite. Takva vremenska karakteristika naziva se stepenastom karakteristikom i ona se normalno danas upotrebljava. Ako, naime, kratki spoj nastane između A i B, distantna zaštita u A treba da djeluje nakon vremena t_1; u slučaju kratkog spoja između B i C, vri-

jeme djelovanja iznosi t_2, dok je za još udaljenije kratke spojeve vrijeme djelovanja t_3. Distantna zaštita s karakteristikom na sl. 7.49. može se ostvariti shemom sa sl. 7.50, na kojoj je radi preglednosti zaštita prikazana samo u jednoj fazi. Pojavom struje kratkog spoja proradit će nadstrujni relej ($I >$) i usmjereni relej (Us), ako je smjer energije od sabirnica



Slika 7.49. Primjer stepenaste vremenske karakteristike distantnog releja A

prema vodu (u slučaju suprotnog smjera energije daljnji rad zaštite bit će onemogućen). Zatvaranjem kontakata nadstrujnog i usmjerenog releja uzbudit će se svitak vremenskog releja (t) i dovest će se napon pozitivnog pola akumulatorske baterije na jedan od kontakata distantnog releja. Ako se kratki spoj nalazi na vodu (sl. 7.49) između tačaka A i B, distantni relej

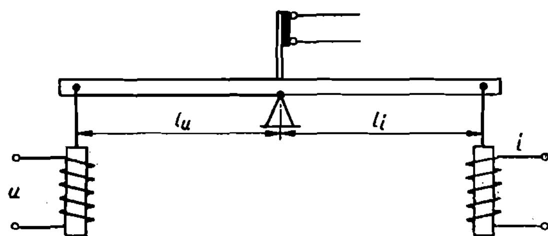


Slika 7.50. Primjer sheme spoja distantne zaštite u jednoj fazi

(Z <) zatvorit će svoj kontakt prije nego što vremenski relej uspije zatvoriti kontakt a_1, pa će preko pomoćnog releja (PR2) sklopka biti isklopljena. Nasuprot tome, ako se kratki spoj nalazi između tačaka B i C (sl. 7.49) distantni relej neće proraditi, jer je impedancija prevelika. Zbog toga će vremenski relej dospjeti da zatvori kontakt a_1, pa će proraditi pomoćni relej (PR1), koji će preklopiti kontakte b_1 i b_2. Prvi preklopni kontakt omogućit će pridržavanje pomoćnog releja (PR1) i nakon prekida kruga preko kontakta a_1, jer će strujni krug svitka pomoćnog releja biti priključen preko kontakata strujnog i usmjerenog releja. Drugi preklopni kontakt (b_2) priključit će naponski svitak distantnog releja na otcjep sekundarne strane naponskog transformatora. Distantni relej će sada proraditi, jer će — radi nižeg napona na naponskom svitku — mjeriti nižu impedanciju, koja je manja od impedancije za koju distantni relej prorađuje. Zbog toga će se zatvoriti kontakt distantnog releja, ali do isklapanja sklopke doći će tek kad se na vremenskom releju zatvori kontakt a_2. Položajem otcjepa na naponskom transformatoru određena je tačka B na vodu (sl. 7.49), a položajem kontakta a_2 na vremenskom releju vrijeme t_2 drugog stepena distantne zaštite. Ako se konačno kratki spoj nalazi dalje od C (sl. 7.49), distantni relej neće proraditi, jer je impedancija — i pored smanjenja napona — veća od one na koju relej reagira, ali će do isklapanja sklopke doći nakon što pomični kontakt vremenskog releja dostigne kontakt a_3. Položajem kontakta a_3 određeno je vrijeme djelovanja trećeg stepena distantne zaštite.

B. Izvedbe distantnog releja

Kao i ostali releji, i distantni se može prikazati u obliku vage (sl. 7.51). Kroz namote protječe struja i proporcionalna struji kratkog spoja I_K, te struja u (treba upozoriti da je sa u označena struja, da bi se razlikovala struja proporcionalna naponu od struje i proporcionalne struji kratkog spoja!) proporcionalna naponu U_K na mjestu kratkog spoja. Možemo, dakle, postaviti



Slika 7.51. Principijelni prikaz izvedbe distantnog releja u obliku vage

$$u = c_{u1} U_K \qquad \ldots (7.16a)$$

$$i = c_{i1} I_K \qquad \ldots (7.16b)$$

Sile na krakove vage proporcionalne su kvadratima tokova, a tokovi — budući da željezne jezgre nisu zasićene — proporcionalni su strujama. Možemo, dakle, postaviti za sile na krakovima vage

$$P_u = c_{u2} u^2 \qquad \ldots (7.17a)$$

$$P_i = c_{i2} i^2 \qquad \ldots (7.17b)$$

Relej djeluje ako se vaga nalazi u ravnoteži ili ako prevlada moment od sile proizvedene svitkom kroz koji protječe struja i. Uvjet ravnoteže glasi

$$P_u l_u = P_i l_i \qquad \ldots (7.18)$$

odakle slijedi

$$c_u u^2 = c_i i^2 \qquad \ldots (7.19)$$

gdje su c_u i c_i konstante u koje su uključene konstante iz (7.16) i (7.17), te duljine krakova (7.18). Iz (7.19) slijedi

$$\left(\frac{u}{i}\right)^2 = \frac{c_i}{c_u} = k_1^2 \qquad \ldots (7.20)$$

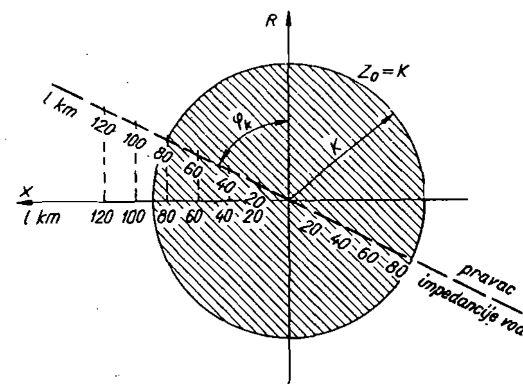
gdje je k_1 konstanta pri kojoj je vaga u ravnoteži. Budući da je

$$\frac{u}{i} = \frac{c_{u1} U_K}{c_{i1} I_K} = c Z \qquad \ldots (7.21)$$

može se postaviti da je

$$Z = \frac{k_1}{c} = K \qquad \ldots (7.22)$$

Zgodno je ako se za prikazivanje djelovanja releja upotrijebi koordinantni sistem djelatnog otpora (R) i reaktancije (X) (sl. 7.52). U takvom koordinatnom sistemu relacija (7.22) prikazana je krugom sa središtem u ishodištu. Relacija $Z = K$ predstavlja naime jednadžbu kruga u polarnim



Slika 7.52. Područje djelovanja distantnog releja za izvedbu prema sl. 7.51.

koordinatama, u kojim je K polumjer kruga. Ako je, dakle, reaktancija voda upravo $|Z_0| = K$, vaga releja bit će u ravnoteži i kontakti releja bit će zatvoreni. Pri $|Z| < |Z_0|$, što se postiže kad je relej bliže mjestu kratkog spoja (manji U_K uz istu struju I_K), pretegnut će moment desnog kraka vage, dok će pri $|Z| > |Z_0|$ prevladati moment lijevog kraka. Prema tome kontakti će biti premošteni za sve $|Z| < |Z_0|$, pa šrafirana površina na sl. 7.52. predstavlja područje djelovanja releja.

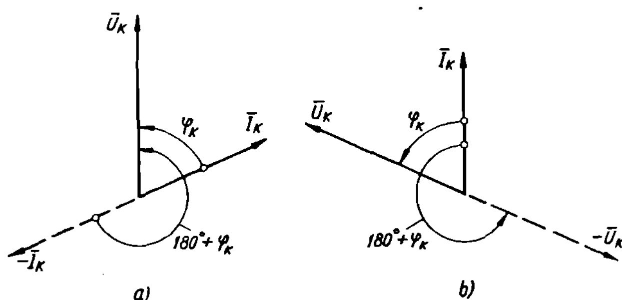
U koordinatni sistem na sl. 7.52. možemo unijeti i impedanciju voda. Budući da su djelatni otpor i reaktancija proporcionalni duljini voda (l), možemo postaviti

$$Z = l\,Z_1 = l\sqrt{R_1^2 + X_1^2} \qquad \dots (7.23)$$

gdje su Z_1, R_1 i X_1 impedancija, djelatni otpor i reaktancija po jedinici duljine, a svakoj duljini voda odgovara tačka u koordinatnom sistemu $R\,X$. Sve tačke leže na pravcu kroz ishodište, koji zatvara kut φ_K s osi ordinata. Kut je određen relacijom

$$\operatorname{tg}\varphi_K = \frac{X_1}{R_1} \qquad \dots (7.24)$$

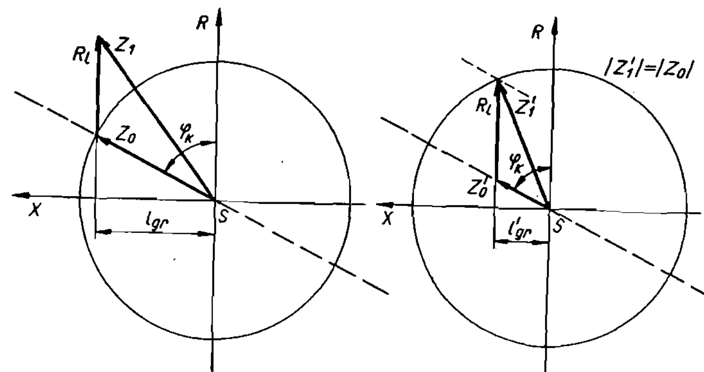
Što je veća duljina voda, tačka na pravcu bit će dalja od ishodišta koordinatnog sistema S, koje odgovara mjestu priključka releja. Na pravcu impedancije mogu se označiti i duljine voda. Pri odnosima koji vrijede za dijagram na sl. 7.52. relej će djelovati ako kratki spoj nastane na udaljenosti od 80 km (granična daljina) ili bliže od mjesta priključka releja. Duljine voda možemo označiti i na apscisi. Produljenje pravca u četvrti kvadrant ima smisla za promijenjeni smjer struje, što se može rastumačiti s dijagramom sa sl. 7.53. Ako mjesto uobičajenog položaja vektora napona (u smjeru ordinate), kako je prikazano na sl. 7.53a, zakrenemo i napon i struju za kut φ_K, past će struja u smjer ordinate, a napon u smjer pravca impedancije (sl. 7.53b), jer je $\mathbf{U}_K = \mathbf{I}_K\,\mathbf{Z}$. Pri suprotnom smjeru



Slika 7.53. Vektorski dijagrami struja kratkog spoja i napona na mjestu releja

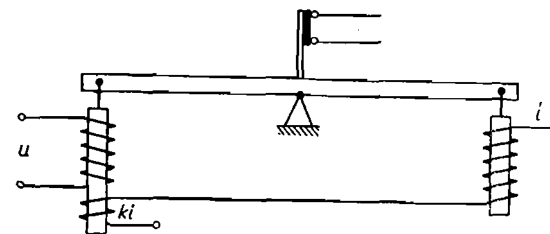
struje imat ćemo iste međusobne odnose kao da je napon zakrenut za 180° ($-\mathbf{U}_K$ na sl. 7.53b). Prema tome relej s karakteristikom sa sl. 7.52. djelovat će bez obzira na smjer struje, ako se kratki spoj nalazi unutar udaljenosti od 80 km s obje njegove strane.

Osim toga, relej s karakteristikom kao na sl. 7.52. u slučaju kratkog spoja preko djelatnog otpora, tj. luka (što je normalno u zračnim vodovima), neće djelovati na istu daljinu kao u slučaju neposrednog (metalnog) kratkog spoja. Zamislimo da je otpor luka R_l, pa će impedancija mjesto Z_0 (ako je kratki spoj nastao na graničnoj daljini l_{gr}) iznositi Z_1 (sl. 7.54a). Relej, dakle, neće djelovati jer je $|Z_1| > |Z_0|$. Radi otpora luka R_l granična daljina l_{gr}' djelovanja releja bit će manja (sl. 7.54b), jer je ta daljina određena ukupnom impedancijom.



Slika 7.54. Utjecaj djelatnog otpora na graničnu daljinu djelovanja distantnog releja izvedenog prema sl. 7.51.

Da se smanji utjecaj otpora luka na graničnu daljinu, mogu se releji izvesti u spoju kao na sl. 7.55. Na lijevi krak vage ne djeluje samo sila proizvedena strujom u, već i sila proizvedena strujom i, koja protječe svitkom koji nema isti broj zavoja kao onaj na desnoj strani. Omjer brojeva zavoja tako je odabran, da svitak na lijevoj strani djeluje kao da



Slika 7.55. Principijelni prikaz izvedbe distantnog releja u obliku vage s krugom, čije je središte na ordinati, kao karakteristikom

kroz njega protječe struja ki. Ako radi pojednostavnjenja razmatranja postavimo da su sve konstante navedene u početku ovog poglavlja jednake jedinici, uvjet ravnoteže možemo napisati

$$|u - ki|^2 = i^2 \qquad \dots (7.25)$$

Omjer između u i i možemo nazvati sekundarnom impedancijom z, pa je

$$z = \frac{u}{i} \qquad \ldots (7.26)$$

a nakon uvrštenja vrijednosti za i iz (7.26) u (7.25) dobivamo

$$|z - k|^2 = 1 \qquad \ldots (7.27)$$

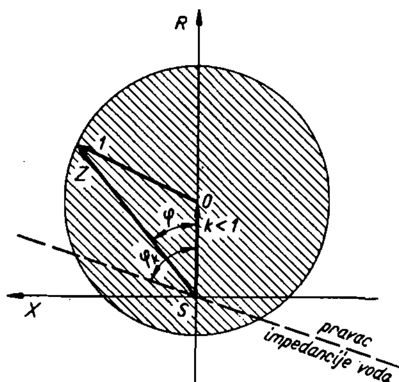
Nakon kvadriranja, uzimajući u obzir da je φ kut između z i k (k pada u os R u koordinatnom sistemu $R\,X$), dobivamo

$$z^2 - 2\,z\,k \cos\varphi + k^2 = 1 \qquad \ldots (7.28)$$

Jednadžba (7.28) prikazuje kružnicu u polarnim koordinatama, gdje su z radij vektor, a φ polarni kut. Krug prikazan jednadžbom (7.28) ima polumjer 1, a polarne koordinate središta jesu $r = k$ i $\varphi = 0$ (sl. 7.56).

Ako postavimo da je

$$Z = K\,z \qquad \ldots (7.29)$$

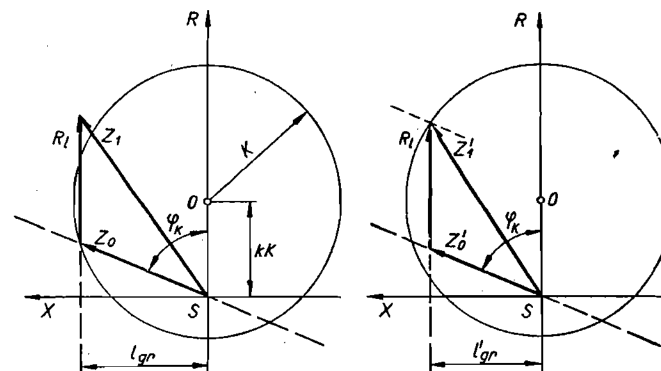


Slika 7.56. Područje djelovanja distantnog releja izvedbe prema sl. 7.55.

gdje je K odnos između impedancije na primarnoj i impedancije na sekundarnoj strani, dobit ćemo iz (7.28) relaciju

$$Z^2 - 2\,Z\,k\,K \cos\varphi + (k\,K)^2 = K^2 \qquad \ldots (7.30)$$

Tada je polumjer kruga K, a pomak središta od ishodišta koordinatnog sistema $k\,K$ (sl. 7.57). Pomakom središta kruga iz ishodišta, odnosno izvedbom kao na sl. 7.55, može se smanjiti utjecaj otpora luka na graničnu daljinu djelovanja releja (sl. 7.57). Promjena granične daljine ovisi o otporu luka. Obično se k izabere to veći, što je φ_k manji (Lit. 98), kako bi se što više smanjio utjecaj otpora luka. Pri $\varphi_k < 60^0$ povoljno je upotrijebiti relej sa $k = 1$ (konduktantni relej), u kojega krug prolazi kroz ishodište koordinatnog sistema (sl. 7.58). Takav relej upotrebljava se za zračne vodove srednjeg napona i za kabelske mreže.



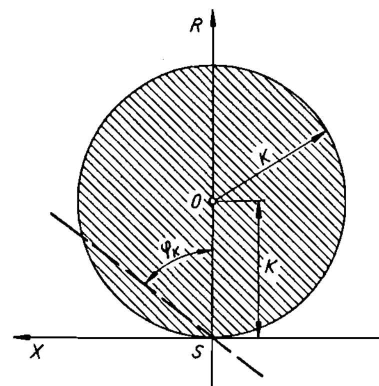
Slika 7.57. Utjecaj djelovanja otpora na graničnu daljinu djelovanja distantnog releja izvedbe prema sl. 7.55.

Mjesto vage može se upotrijebiti istosmjerni relej, kao za usmjereni relej (sl. 7.26). Priključak se izvodi prema sl. 7.59, a ispravljačima se dovodi geometrijska razlika struje u i struje $k\,i$, dok istosmjerni relej uspoređuje samo aritmetičku razliku struje $u - k\,i$ i struje i. Uvjet ravnoteže određen je izrazom

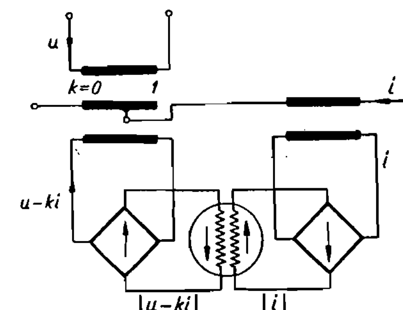
$$|u - k\,i| = |i| \qquad \ldots (7.31)$$

Odnose za slučaj kad je udaljenost kratkog spoja manja od granične daljine prikazuje sl. 7.60a, dok se prilike za slučaj veće udaljenosti od granične daljine vide na sl. 7.60b.

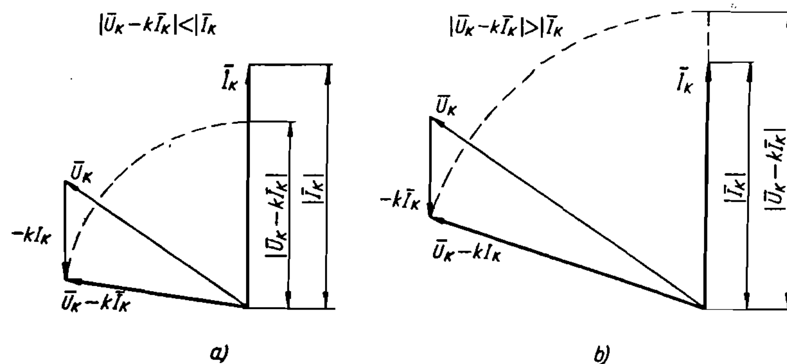
Distantni relej može se izvesti kao indukcioni s cilindričkim rotorom. Relej će biti u ravnoteži kad tokovi u njemu budu međusobno u fazi prema



Slika 7.58. Područje djelovanja konduktantnog releja (distantni relej prema sl. 7.55. s $k = 1$)

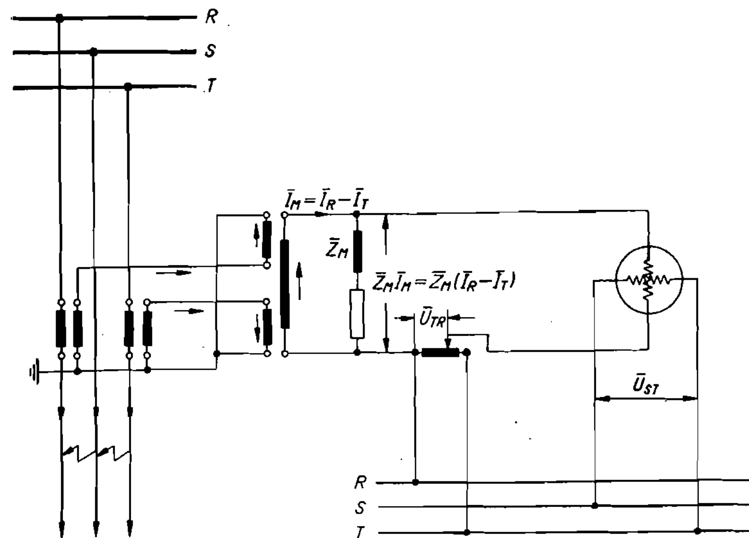


Slika 7.59. Principijelni prikaz izvedbe i priključak distantnog releja s usporedbom ispravljenih struja



Slika 7.60. Naponi i struje koje djeluju u distantnom releju s usporedbom ispravljenih struja; (a) udaljenost kratkog spoja manja, (b) udaljenost kratkog spoja veća od granične daljine

relaciji (7.1). Budući da su tokovi proporcionalni strujama, a struje naponima, može se poći od naponâ, koji djeluju na namote releja. Promotrimo djelovanje releja u slučaju tropolnog kratkog spoja. Shema spoja prikazana je na sl. 7.61. Na jedan od svitaka djeluje napon sastavljen od pada napona u impedanciji $\mathbf{Z}_M$, kroz koju protječe razlika struja $\mathbf{I}_M = \mathbf{I}_R - \mathbf{I}_T$



Slika 7.61. Shema spoja distantnog releja izvedenog kao indukcioni relej s cilindričkim rotorom za tropolni kratki spoj

i linijskog napona $\mathbf{U}_{TR}$, dok na drugi djeluje linijski napon $\mathbf{U}_{ST}$. Prema tome možemo postaviti

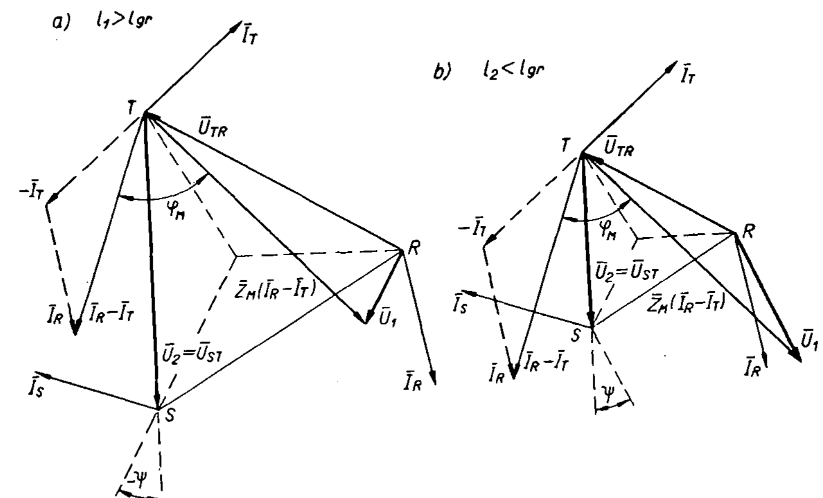
$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_{TR} + \mathbf{Z}_M (\mathbf{I}_R - \mathbf{I}_T) \qquad \ldots (7.31)$$

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{U}_{ST} \qquad \ldots (7.32)$$

Zakretni moment bit će, kako je spomenuto, jednak nuli kad tokovi budu u fazi ili u protufazi odnosno kad bude $\sin \psi = 0$, gdje je ψ fazni pomak među tokovima. U tom slučaju veličina tokova, odnosno naponâ, nema utjecaja, pa će rotor biti u ravnoteži kad je

$$\mathbf{U}_1 = \lambda\, \mathbf{U}_2 \qquad \ldots (7.33)$$

gdje je λ parametar $(-\infty \leqq \lambda \leqq \infty)$. Naravno da će zakretni momenat biti jednak nuli i onda kad je bilo koji od napona ($\mathbf{U}_1$ ili $\mathbf{U}_2$) jednak nuli.



Slika 7.62. Naponi koji djeluju na svitke releja na sl. 7.61. u slučaju tropolnog kratkog spoja

Da se pokaže utjecaj udaljenosti kratkog spoja od mjesta releja na djelovanje releja spojenog prema shemi na sl. 7.61, promotrimo položaje vektora $\mathbf{U}_1$ i $\mathbf{U}_2$ za veću udaljenost $l > l_{gr}$ (sl. 7.62a) i manju udaljenost $l < l_{gr}$ (sl. 7.62b) mjesta kratkog spoja od releja. Veličine struja jednake su u oba slučaja, dok su naponi na mjestu releja to veći, što je kratki spoj dalji, a budući da se radi o tropolnom kratkom spoju, nema deformacije trokuta naponâ. Izlazi da u prvom slučaju $(l_1 > l_{gr})$ $\mathbf{U}_1$ zaostaje za $\mathbf{U}_2$, a u drugom $(l_2 < l_{gr})$ $\mathbf{U}_1$ prethodi ispred $\mathbf{U}_2$. U prvom slučaju, dakle, relej neće djelovati, dok će u drugom zatvoriti kontakte. Osim toga se pokazuje da postoji granična daljina l_{gr} $(l_2 < l_{gr} < l_1)$ pri kojoj će naponi $\mathbf{U}_1$ i $\mathbf{U}_2$ biti u fazi. Promjena granične daljine može se postići promjenom veličine napona $\mathbf{U}_{TR}$, jer se na taj način može promijeniti smjer napona $\mathbf{U}_1$.

Odredimo još uvjete uz koje je zadovoljena jednadžba (7.33). Budući da se javljaju samo komponente direktnog sistema, nije potrebno uzimati u obzir ostale sisteme. Fazni naponi na mjestu kratkog spoja jesu

$$\mathbf{V}_R = \mathbf{I}_R \mathbf{Z} \qquad \dots (7.34)$$

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{I}_S \mathbf{Z} = a^2 \mathbf{I}_R \mathbf{Z} \qquad \dots (7.35a)$$

$$\mathbf{V}_T = \mathbf{I}_T \mathbf{Z} = a \mathbf{I}_R \mathbf{Z} \qquad \dots (7.35b)$$

gdje je $\mathbf{Z}$ impedancija voda između mjesta kratkog spoja i releja. Naponi koji djeluju na svitke releja jesu

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_1 &= \mathbf{V}_T - \mathbf{V}_R + \mathbf{Z}_M (\mathbf{I}_R - \mathbf{I}_T) = \\ &= \mathbf{I}_R [(a-1)\mathbf{Z} + (1-a)\mathbf{Z}_M] = \\ &= (a-1)(\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_M)\mathbf{I}_R \end{aligned} \qquad \dots (7.36)$$

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{V}_S - \mathbf{V}_T = (a^2 - a)\mathbf{I}_R \mathbf{Z} \qquad \dots (7.37)$$

Uzimajući u obzir relaciju (7.33) dobivamo

$$(a-1)(\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_M)\mathbf{I}_R = \lambda (a^2 - a)\mathbf{I}_R \mathbf{Z} \qquad \dots (7.38)$$

odakle slijedi

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_M}{1 - \lambda a} = \frac{\mathbf{Z}_M}{1 - \lambda \underline{/120^0}} \qquad \dots (7.39)$$

Relacija (7.39) predstavlja krug u kompleksnoj ravnini, koji se određuje inverzijom pravca što se nalazi u nazivniku, te množenjem tako dobivene kružnice sa $\mathbf{Z}_M$ (sl. 7.63).

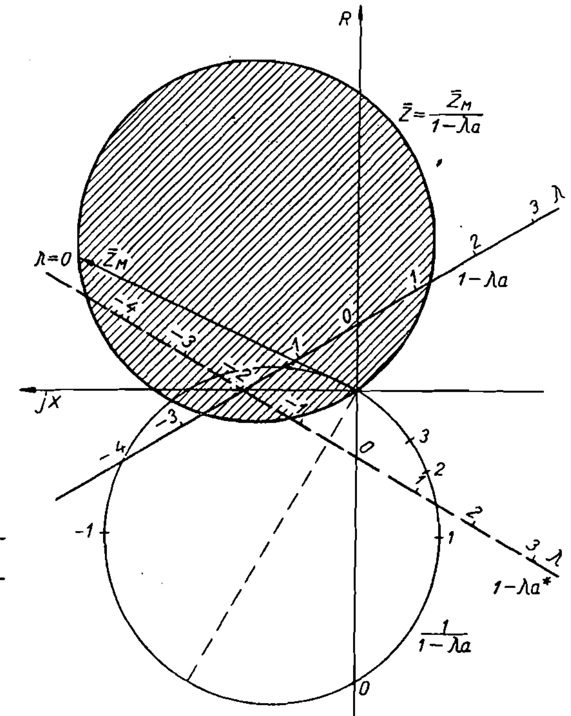
Da bi relej djelovao pri jednopolnom kratkom spoju, moramo upotrijebiti spoj prema sl. 7.64. Strujni transformatori potrebni su u sve tri faze. Kroz jedan od tri namota pomoćnih strujnih transformatora protječe struja faze, a kroz drugi zbroj struja triju faza. Kroz tercijarni namot protječe struja $\mathbf{I}_R + k_0(\mathbf{I}_R + \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T)$. Konstanta k_0 pojavljuje se zbog razlike u prijenosnim omjerima. Struja tercijarnog namota protječe kroz impedanciju $\mathbf{Z}_M$, pa pad napona na toj impedanciji djeluje na svitak releja Na isti svitak djeluje napon $\mathbf{V}_R$. Drugi svitak releja priključen je na napon $\mathbf{U}_{TS}$. Iskustvo tvornice koja proizvodi takve releje pokazuje da je s obzirom na rad releja u slučaju kratkog spoja povoljno preko otpora priključiti na svitak releja napon koji za 12^0 prethodi (Lit. 100) pred naponom $\mathbf{U}_{TS}$. Rotor releja i sada je u ravnoteži, kad su naponi svitaka u fazi ili protufazi.

Da bismo odredili struje i napone na releju, poslužimo se nadoknadnom shemom jednopolnog kratkog spoja (sl. 7.65). Pretpostavimo da je kratki spoj nastao na kraju voda, a da se relej nalazi na njegovu početku. Budući je $\mathbf{I}_d = \mathbf{I}_i = \mathbf{I}_o = \frac{1}{3}\mathbf{I}_R$ (ako pretpostavimo da je kratki spoj nastao u fazi R), napone na početku voda možemo prikazati relacijama

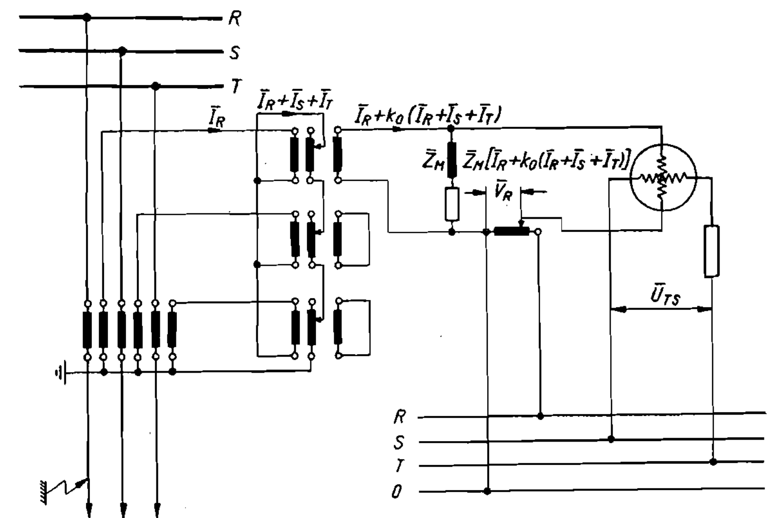
$$\mathbf{V}_d' = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d \mathbf{Z}_m \qquad \dots (7.40a)$$

$$\mathbf{V}_i' = -\mathbf{I}_d \mathbf{Z}_m \qquad \dots (7.40b)$$

$$\mathbf{V}_o' = -\mathbf{I}_d \mathbf{Z}_{om} \qquad \dots (7.40c)$$



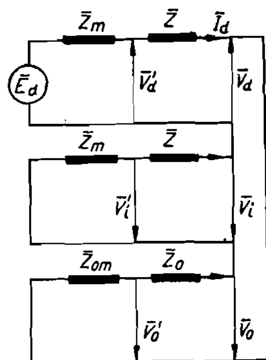
Slika 7.63. Područje djelovanja releja na sl. 7.61 u slučaju tropolnog kratkog spoja



Slika 7.64. Shema spoja distantnog releja izvedenog kao indukcioni relej s cilindričkim rotorom za slučaj jednopolnog kratkog spoja

gdje su $\mathbf{Z}_m$ direktna i inverzna, a $\mathbf{Z}_{om}$ nulta impedancija mreže iz koje se napaja promatrani vod. Elektromotornu silu $\mathbf{E}_d$ na generatoru određujemo prema shemi sa sl. 7.65.

$$\mathbf{E}_d = \mathbf{I}_d (2\,\mathbf{Z}_m + 2\,\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o) \qquad \ldots (7.41)$$



Slika 7.65. Ekvivalentna shema za jednopolni kratki spoj na kraju voda (Z_m i Z_{om} impedancije mreže, Z i Z_o impedancije voda; V_d, V_i i V_o naponi na kraju voda; V_d', V_i' i V_o' naponi na početku voda)

pretpostavka: $Z_d = Z_i = Z$, $Z_{dm} = Z_{im} = Z_m$

Napon $\mathbf{V}_R$ na početku voda možemo pomoću simetričnih komponenata prikazati izrazom

$$\mathbf{V}_R' = \mathbf{V}_d' + \mathbf{V}_i' + \mathbf{V}_o' = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d (2\,\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z}_o) \qquad \ldots (7.42)$$

pa uvrštavanjem za $\mathbf{E}_d$ vrijednosti iz (7.41) dobivamo

$$\mathbf{V}_R' = \mathbf{I}_d (2\,\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_o)$$

Napon $\mathbf{U}_1$, koji djeluje na svitak releja, jednak je

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{V}_R' - \mathbf{Z}_M (\mathbf{I}_R + k_o \mathbf{I}_R) \qquad \ldots (7.43)$$

Pri tome je uzeto u obzir da je $\mathbf{I}_S = \mathbf{I}_T = 0$. Ako još uvrstimo da je $\mathbf{I}_d = \frac{1}{3}\,\mathbf{I}_R$, dobivamo

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{I}_R \left[\frac{2\,\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_o}{3} - \mathbf{Z}_M (1 + k_o)\right] \qquad \ldots (7.44)$$

a uvrštavanjem za

$$\mathbf{Z}_o = \mathbf{Z}\,(3\,k_o + 1) \qquad \ldots (7.45)$$

imamo

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{I}_R (1 + k_o)(\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_M) \qquad \ldots (7.46)$$

Linijski napon $\mathbf{U}_{RS}$ određuje se iz relacije

$$\mathbf{U}_{TS} = \mathbf{V}_T' - \mathbf{V}_S' = a\,\mathbf{V}_d' + a^2\,\mathbf{V}_i' + \mathbf{V}_o' - a^2\,\mathbf{V}_d' - a\,\mathbf{V}_i' - \mathbf{V}_o' = (a - a^2)(\mathbf{V}_d' - \mathbf{V}_i') \qquad \ldots (7.47)$$

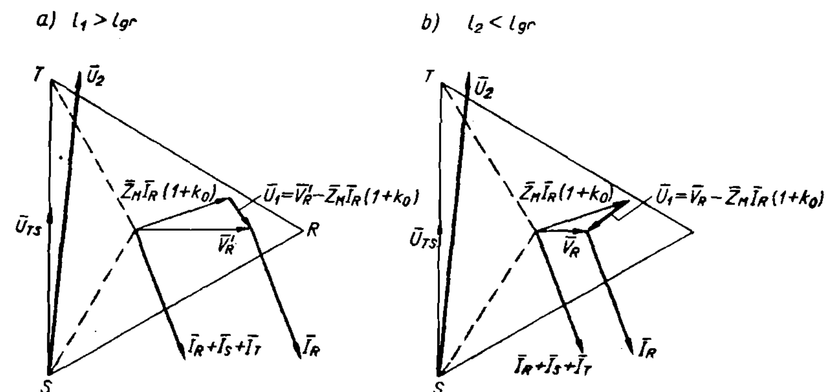
Uvrštavanjem vrijednosti iz (7.40) dobivamo

$$\mathbf{U}_{TS} = (a - a^2)\,\mathbf{E}_d = j\,I_R \frac{\sqrt{3}}{3} (2\,\mathbf{Z}_m + 2\,\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o) \qquad \ldots (7.48)$$

Uzimajući u obzir zakret od 12° i relaciju (7.45), napon na drugom svitku releja jest

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{U}_{TS}\underline{/12^0} = \sqrt{3}\,I_R \left[\frac{1}{3}(2\,\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z}_{om}) + \mathbf{Z}\,(1 + k_o)\right]\underline{/102^0} \qquad \ldots (7.49)$$

Na sl. 7.66. prikazani su naponi i struje za veći ($l_1 > l_{gr}$) i manji ($l_2 < l_{gr}$) razmak između releja i kratkog spoja. Kao i na sl. 7.62. vektorski dijagrami su radi pojednostavnjenja crtani uz pretpostavku da kratki spoj ostaje na istom mjestu; jednom se promatraju prilike na daljem, a drugi put na bližem releju. Usporedbom smjerova vektora $\mathbf{U}_1$ i $\mathbf{U}_2$ mogu se konstatirati različiti smjerovi zakretâ rotora.



Slika 7.66. Naponi koji djeluju na svitke releja na sl. 7.64. u slučaju jednopolnog kratkog spoja

Analogno kao za tropolni kratki spoj, a pomoću relacije (7.33), moglo bi se odrediti područje djelovanja releja.

Udešenje vremena može se postići odvojenim vremenskim relejom (npr. prema sl. 7.50) ili relejom u kojega je vrijeme od uzbude do zatvaranja kontakata ovisno o veličini mjerene impedancije. U prvom slučaju stupnjevanje se postiže bilo prespajanjem na odvojak naponskog transformatora, bilo premoštenjem dijela namota naponskog transformatora. Za drugi tip postiže se ovisnost vremena o impedanciji pogodnom mehaničkom konstrukcijom (promjena kraka vage i sl.). Noviji releji izvode se obično s posebnim vremenskim relejom.

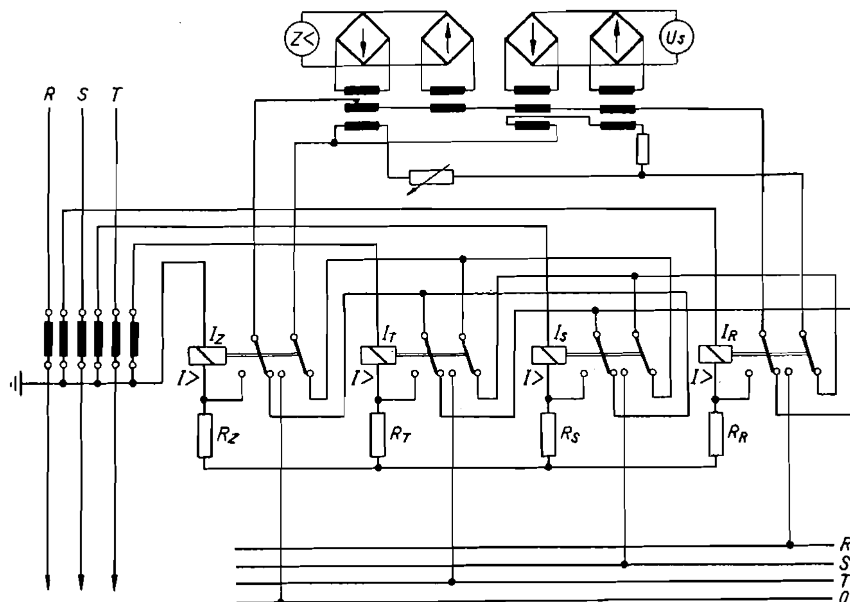
C. Primjeri praktičkih izvedbi distantnih releja

Težnja je tvornica da proizvode distantnu zaštitu s najmanjim mogućim brojem distantnih releja, jer je taj član najskuplji dio ove zaštite. Novije izvedbe imaju samo jedan distantni relej sa dva, tri i šest nadstrujnib releja.

Na sl. 7.67. prikazana je shema djelovanja distantnog releja s usporedbom ispravljenih struja (sl. 7.59). Osim distantnog releja postoji i usmjereni relej iste izvedbe (sl. 7.26), jer upotrebljeni distantni relej može djelovati i pri suprotnom smjeru energije. U shemi na sl. 7.67. izostavljen je radi pojednostavnjenja vremenski relej i svi pomoćni releji, a prikazano je prespajanje na određene struje i napone u ovisnosti o vrsti kratkog spoja. Nadstrujni releji djeluju u ovisnosti o vrsti kratkog spoja i preko preklopnih kontakata spajaju na pomoćne strujne transformatore struje i napone koji omogućuju ispravno djelovanje releja. Veličine struja koje se dovode u pomoćni strujni transformator proporcionalne su padu napona u djelatnim otporima (R_R, R_S, R_T i R_Z), koji se nalaze u sekundarnom krugu strujnih transformatora, dok je pad napona u tim otporima proporcionalan struji u vodovima.

Promotrimo djelovanje releja pri tropolnom kratkom spoju, kad će proraditi sva tri releja kroz koja protječu struje u fazama (I_R, I_S i I_T). Kroz namot pomoćnog strujnog transformatora proteći će struja proporcionalna razlici struja I_R i I_T, pa za struju kroz relej (I_M) možemo postaviti

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{I}_R - \mathbf{I}_T \qquad \dots (7.50)$$



Slika 7.67. Shema spoja distantne zaštite s jednim relejem s usporedbom ispravljenih struja

(radi pojednostavnjenja pretpostavljeno je da su svi faktori proporcionalnosti jednaki jedinici). Zbog preklapanja kontakata kroz svitke pomoćnog strujnog transformatora protjecat će također struja proporcionalna linijskom naponu

$$\mathbf{U}_M = \mathbf{U}_{RT} = \mathbf{V}_R - \mathbf{V}_T \qquad \dots (7.51)$$

Prema ekvivalentnoj shemi za tropolni kratki spoj (sl. 7.68), s oznakama kao na sl. 7.65. za tropolni kratki spoj, vrijedi

$$\mathbf{I}_R = \mathbf{I}_d \qquad \dots (7.52a)$$

$$\mathbf{I}_T = a\mathbf{I}_d \qquad \dots (7.52b)$$

pa je

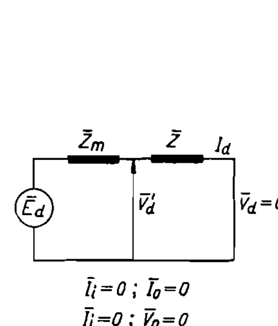
$$\mathbf{I}_M = (1 - a)\,\mathbf{I}_d \qquad \dots (7.53)$$

Na početku voda napon direktnog sistema jest

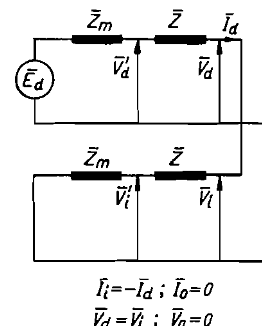
$$\mathbf{V}_d' = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_m = \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z} \qquad \dots (7.54)$$

jer je elektromotorna sila

$$\mathbf{E}_d = \mathbf{I}_d\,(\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z}) \qquad \dots (7.55)$$



Slika 7.68. Ekvivalentna shema za određivanje napona na početku voda za slučaj tropolnog kratkog spoja na kraju voda



Slika 7.69. Ekvivalentna shema za određivanje napona na početku voda za slučaj dvopolnog kratkog spoja na kraju voda

što izlazi iz prilika na mjestu kratkog spoja ($\mathbf{V}_d = 0$). Fazni naponi na početku voda jesu

$$\mathbf{V}_R = \mathbf{V}_d' = \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z} \qquad \dots (7.56a)$$

$$\mathbf{V}_T = a\,\mathbf{V}_d' = a\,\mathbf{I}_d\,\mathbf{Z} \qquad \dots (7.57a)$$

pa je linijski napon na početku voda

$$\mathbf{U}_M = \mathbf{U}_{RT} = (1 - a)\,\mathbf{I}_d\,\mathbf{Z} \qquad \dots (7.58)$$

Omjer mjerenog napona i mjerene struje jeste

$$\frac{\mathbf{U}_M}{\mathbf{I}_M} = \frac{(1-a)\,\mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}}{(1-a)\,\mathbf{I}_d} = \mathbf{Z} \qquad \dots (7.59)$$

pa relej djeluje u ovisnosti o impedanciji, odnosno duljini voda.

Pri dvopolnom kratkom spoju među fazama S i T proradit će releji kroz koje protječu struje I_S i I_T, pa će struja kroz pomoćni strujni transformator biti

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{I}_S - \mathbf{I}_T \qquad \dots (7.60)$$

a napon

$$\mathbf{U}_M = \mathbf{U}_{ST} = \mathbf{V}_S - \mathbf{V}_T \qquad \dots (7.61)$$

Prema ekvivalentnoj shemi na sl. 7.69. možemo postaviti (za $\mathbf{I}_d = -\mathbf{I}_i$)

$$\mathbf{I}_S = a^2\,\mathbf{I}_d + a\,\mathbf{I}_i = (a^2 - a)\,\mathbf{I}_d \qquad \dots (7.62a)$$

$$\mathbf{I}_T = a\,\mathbf{I}_d + a^2\,\mathbf{I}_i = (a - a^2)\,\mathbf{I}_d \qquad \dots (7.62b)$$

pa je (7.60)

$$\mathbf{I}_M = 2\,(a^2 - a)\,\mathbf{I}_d \qquad \dots (7.63)$$

Da bismo došli do elektromotorne sile, pođimo od uvjeta na mjestu kratkog spoja ($\mathbf{V}_d = \mathbf{V}_i$, $\mathbf{V}_o = 0$), pa iz

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\,(\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z}) \qquad \dots (7.64)$$

uz $\mathbf{V}_i = -\mathbf{I}_i\,(\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z})$ dobivamo

$$\mathbf{E}_d = 2\,\mathbf{I}_d\,(\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z}) \qquad \dots (7.65)$$

Naponi su na početku voda

$$\mathbf{V}_d' = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_m = \mathbf{I}_d\,(\mathbf{Z}_m + 2\,\mathbf{Z}) \qquad \dots (7.66a)$$

$$\mathbf{V}_i' = -\mathbf{I}_i\,\mathbf{Z}_m = \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_m \qquad \dots (7.66b)$$

pa su fazni naponi na početku voda

$$\mathbf{V}_S = a^2\,\mathbf{V}_d' + a\,\mathbf{V}_i' = \mathbf{I}_d\,[(a^2 + a)\,\mathbf{Z}_m + 2\,a^2\mathbf{Z}] \qquad \dots (7.67a)$$

$$\mathbf{V}_T = a\,\mathbf{V}_d' + a^2\,\mathbf{V}_i' = \mathbf{I}_d\,[(a^2 + a)\,\mathbf{Z}_m + 2\,a\,\mathbf{Z}]$$

Prema tome je

$$\mathbf{U}_M = \mathbf{U}_{ST} = 2\,(a^2 - a)\,\mathbf{Z}\,\mathbf{I}_d \qquad \dots (7.68)$$

pa je omjer napona $\mathbf{U}_M$ i struje $\mathbf{I}_M$ opet jednak impedanciji voda. Pri dvopolnim kratkim spojevima među fazama R i S, te među fazama R i T, dobiva se isti rezultat analognim postupkom.

Pri jednopolnom kratkom spoju u fazi R proradit će releji kroz koje protječu struje I_R i I_Z, pa će radi toga namoti pomoćnog strujnog transformatora biti priključeni na napon

$$\mathbf{U}_M = \mathbf{V}_R \qquad \dots (7.69)$$

dok će kroz namote protjecati struja

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{I}_R + k_o\,\mathbf{I}_Z \qquad \dots (7.70)$$

gdje je k_o konstanta definirana relacijom

$$k_o = \frac{1}{3}\left(\frac{\mathbf{Z}_o}{\mathbf{Z}} - 1\right) \qquad \dots (7.71)$$

Udešenje konstante k_o postiže se promjenom otpora R_Z u odnosu na otpore R_R, R_S i R_T (sl. 7.67), tako da će biti $R_R = R_S = R_T = k_o R_Z$. Iz ekvivalentne sheme (sl. 7.65) za napone na početku voda imamo

$$\mathbf{V}_d' = \mathbf{E}_d - \mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_m \qquad \dots (7.72a)$$

$$\mathbf{V}_i' = -\mathbf{I}_i\,\mathbf{Z}_m \qquad \dots (7.72b)$$

$$\mathbf{V}_o' = -\mathbf{I}_o\,\mathbf{Z}_{om} \qquad \dots (7.72c)$$

Budući da je $\mathbf{I}_d = \mathbf{I}_i = \mathbf{I}_o$, elektromotorna sila jest

$$\mathbf{E}_d = \mathbf{I}_d\,(2\,\mathbf{Z}_m + 2\,\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o) \qquad \dots (7.78)$$

pa su naponi na mjestu kvara

$$\mathbf{V}_d' = \mathbf{I}_d\,(\mathbf{Z}_m + 2\,\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o) \qquad \dots (7.79a)$$

$$\mathbf{V}_i' = -\mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}_m \qquad \dots (7.79b)$$

$$\mathbf{V}_o' = -\mathbf{I}_o\,\mathbf{Z}_{om} \qquad \dots (7.79c)$$

Napon $\mathbf{U}_M$ (7.69) je dakle

$$\mathbf{U}_M = \mathbf{V}_R = \mathbf{V}_d' + \mathbf{V}_i' + \mathbf{V}_o' = \mathbf{I}_d\,(2\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_o) \qquad \dots (7.80)$$

Iz (7.71) dobivamo $\mathbf{Z}_o = \mathbf{Z}\,(3\,k_o + 1)$, pa je

$$\mathbf{U}_M = 3\,\mathbf{I}_d\,\mathbf{Z}\,(1 + k_o) \qquad \dots (7.81)$$

Struje su

$$\mathbf{I}_R = \mathbf{I}_d + \mathbf{I}_i + \mathbf{I}_o = 3\,\mathbf{I}_d \qquad \dots (7.82a)$$

$$\mathbf{I}_Z = 3\,\mathbf{I}_o = 3\,\mathbf{I}_d \qquad \dots (7.82b)$$

pa je struja $\mathbf{I}_M$ (7.70)

$$\mathbf{I}_M = 3\,\mathbf{I}_d\,(1 + k_o) \qquad \dots (7.83)$$

Omjer napona $\mathbf{U}_M$ (7.81) i struje $\mathbf{I}_M$ (7.83) i opet je jednak direktnoj impedanciji voda $\mathbf{Z}$.

Preostaje još da razmotrimo odnose pri dvopolnom kratkom spoju s istodobnim spojem sa zemljom. Ako kratki spoj nastane među fazama S i T, djelovat će releji kroz koje protječu struje I_S, I_T i I_Z, pa će na svitke pomoćnog transformatora biti priključen napon

$$\mathbf{U}_M = \mathbf{V}_S \qquad \dots (7.84)$$

dok će kroz svitke pomoćnog transformatora protjecati struja

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{I}_S + k_o\,\mathbf{I}_Z \qquad \dots (7.85)$$

Elektromotorna sila (sl. 7.70) iznosi

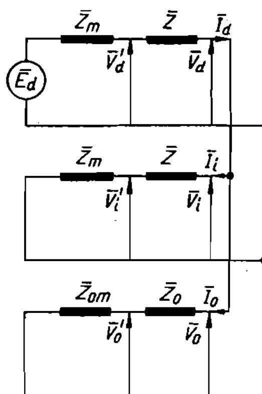
$$\mathbf{E}_d = \mathbf{I}_d \left[\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z} + \frac{(\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z})(\mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o)}{\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o} \right] \qquad \ldots (7.86)$$

a komponente struja

$$\mathbf{I}_i = - \mathbf{I}_d \frac{\mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o}{\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o} \qquad \ldots (7.87a)$$

$$\mathbf{I}_o = - \mathbf{I}_d \frac{\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z}}{\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o} \qquad \ldots (7.87b)$$

što sve izlazi iz uvjeta za kratki spoj na kraju voda. Uvrštavanjem u izraze za komponente napona na početku voda (7.72), dobivamo



$\bar{I}_d + \bar{I}_i + \bar{I}_o = 0$
$\bar{V}_d = \bar{V}_i = \bar{V}_o$

Slika 7.70. Ekvivalentna shema za određivanje napona na početku voda za slučaj dvopolnog kratkog spoja s istodobnim spojem sa zemljom na kraju voda

$$\mathbf{V}_d' = \mathbf{I}_d \left[\mathbf{Z} + \frac{(\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z})(\mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o)}{\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o} \right] \qquad \ldots (7.88a)$$

$$\mathbf{V}_i' = \mathbf{I}_d \frac{\mathbf{Z}_m (\mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o)}{\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_a} \qquad \ldots (7.88b)$$

$$\mathbf{V}_o' = \mathbf{I}_d \frac{\mathbf{Z}_{om} (\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z})}{\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o} \qquad \ldots (7.88c)$$

Napon $\mathbf{U}_M$ je dakle

$$\mathbf{U}_M = \mathbf{V}_S = \frac{\mathbf{I}_d}{\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o} \{ a^2 [\mathbf{Z} (\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o) +$$

$$+ (\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z})(\mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o)] + a \, \mathbf{Z}_m (\mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o) + \mathbf{Z}_{om} (\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z}) \} \qquad \ldots (7.89)$$

Uzimajući u obzir da je $a^2 + a = -1$, te nakon uvrštavanja vrijednosti za $\mathbf{Z}_o$ iz (7.71), dobivamo

$$\mathbf{U}_M = \frac{\mathbf{I}_d \, \mathbf{Z}}{\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o} \{ a^2 [\mathbf{Z}_m + 3 \, \mathbf{Z} (1 + 2 \, k_o) + 2 \, \mathbf{Z}_{om}] +$$

$$+ \mathbf{Z}_{om} - \mathbf{Z}_m (1 + 3 \, k_o) \} \qquad \ldots (7.90)$$

Struja $\mathbf{I}_M$ (7.85) iznosi

$$\mathbf{I}_M = a^2 \, \mathbf{I}_d + a \, \mathbf{I}_i + \mathbf{I}_o (1 + 3 \, k_o), \qquad \ldots (7.91)$$

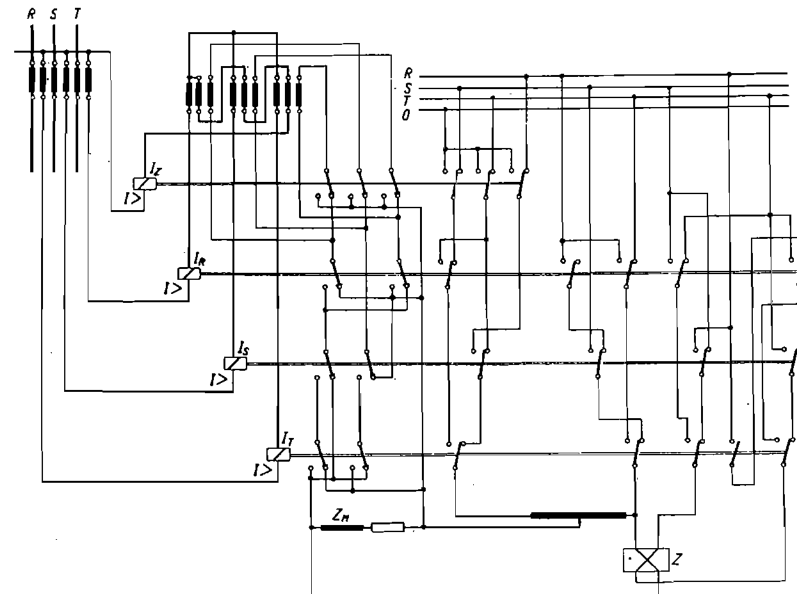
jer je $\mathbf{I}_Z = 3 \, \mathbf{I}_o$. Uvrštavanjem vrijednosti za struje iz (7.87) dobiva se

$$\mathbf{I}_M = \frac{\mathbf{I}_d}{\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o} [a^2 (\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o) -$$

$$- a (\mathbf{Z}_{om} + \mathbf{Z}_o) - (\mathbf{Z}_m + \mathbf{Z})(1 + 3 \, k_o)] \qquad \ldots (7.92)$$

odakle, uzimajući u obzir (7.71), te da je $-a = a^2 + 1$, dolazimo do izraza za struju $\mathbf{I}_M$, iz kojega je omjer $\mathbf{U}_M$ i $\mathbf{I}_M$ jednak impedanciji voda $\mathbf{Z}$. Analogno se dobiva za kratke spojeve među fazama R—S i R—T.

Prema tome za sve vrste kratkog spoja omjer napona $\mathbf{U}_M$ i struje $\mathbf{I}_M$ jednak je impedanciji između mjesta priključka releja i mjesta kratkog spoja, pa relej s preklopnim kontaktima prema shemi na sl. 7.67. djeluje selektivno s obzirom na udaljenost kratkog spoja, za sve vrste kratkih spojeva.



Slika 7.71. Shema spoja distantne zaštite s jednim indukcionim relejem s cilindričkim rotorom

Na sl. 7.71. prikazana je shema spoja distantne zaštite s jednim indukcionim relejom s cilindričkim rotorom, koji radi na već opisanom principu. I opet postoje četiri nadstrujna releja, koji prema vrsti kratkog spoja spajaju na Z_M određene struje i određene napone u oba kruga svitaka releja. Struja I_Z releja koji reagira u slučaju spoja sa zemljom dobiva se pomoću sekundarnog namota spojenog u trokut, dok se struje koje protječu kroz impedanciju Z_M dobivaju iz tercijarnog namota pomoćnog strujnog transformatora.

7.7. DIFERENCIJALNI RELEJI

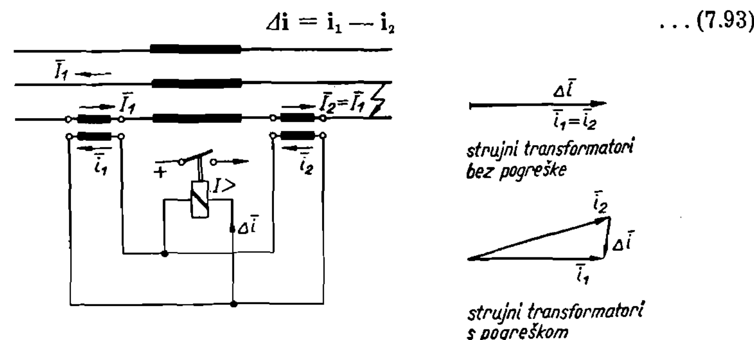
A. Princip djelovanja

Diferencijalni releji uspoređuju istovremene veličine i mjere njihovu razliku, odnosno djeluju u ovisnosti o toj razlici. Spoj se odabire po principu da u normalnom pogonu kroz relej ne teče struja, odnosno da relej ne djeluje. Nasuprot tome, u slučaju kvara unutar područja koje štiti diferencijalni relej (štićeno područje) zaštita mora proraditi i dati impuls za daljnje djelovanje (isklapanje sklopke i sl.).

Diferencijalni releji su u principu nadstrujni neusporeni releji, koji uspoređuju ili struje na početku i na kraju štićenog dijela postrojenja (generatora, transformatora, vodova i sl.), ili pak struje na istom kraju dvaju ili više dijelova postrojenja. U prvom slučaju govorimo o uzdužnoj, a u drugom o poprečnoj diferencijalnoj zaštiti. Bavit ćemo se u prvom redu uzdužnom diferencijalnom zaštitom.

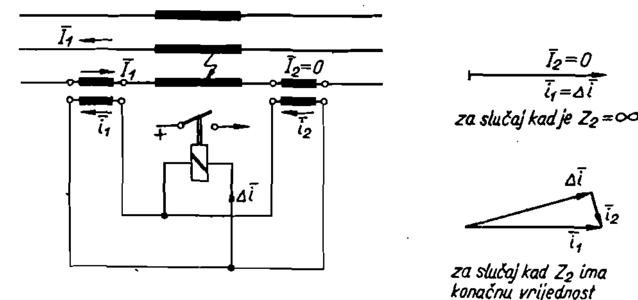
Promotrimo u najjednostavnijem slučaju prilike u sekundarnim krugovima strujnih transformatora na koje je spojen diferencijalni relej (sl. 7.72. do 7.74). Diferencijalna zaštita štiti dio mreže (prikazan sa svicima) koji se nalazi među strujnim transformatorima, na čije je sekundarne namote priključen diferencijalni relej. Ako pretpostavimo da na oba kraja imamo strujne transformatore tačno istih karakteristika (isti prijenosni omjer, iste nadstrujne karakteristike itd), u normalnom pogonu i u slučaju kvara izvan štićenog područja (sl. 7.72) neće teći struja kroz diferencijalni relej. Struja je definirana relacijom

$$\Delta \mathbf{i} = \mathbf{i}_1 - \mathbf{i}_2 \qquad \ldots (7.93)$$



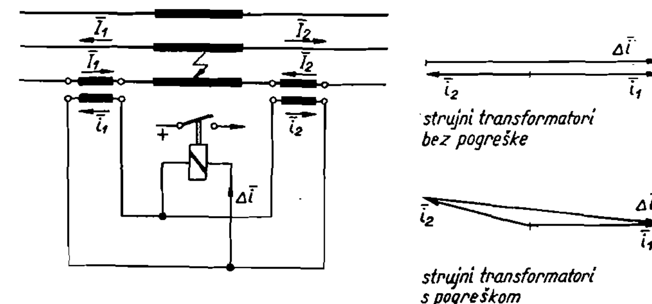
Slika 7.72. Struje u krugu diferencijalnog releja za slučaj kvara izvan štićenog područja

Budući da su sekundarne struje međusobno jednake ($\mathbf{i}_1 = \mathbf{i}_2$), kad su — uz prihvaćene pretpostavke — i primarne međusobno jednake ($\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2$) struja je kroz relej $\Delta \mathbf{i} = 0$. Ako karakteristike strujnih transformatora nisu iste, sekundarne struje će se razlikovati i po iznosu i po fazi, pa će kroz diferencijalni relej teći neka struja $\Delta \mathbf{i} \neq 0$. Struja $\Delta \mathbf{i}$ normalno će biti veća što je veća primarna struja, jer se u nadstrujnom području normalno karakteristike strujnih transformatora više razlikuju, no i male razlike u karakteristikama — radi velikih struja — izazvat će relativno velike struje kroz diferencijalni relej.



Slika 7.73 Struje u krugu diferencijalnog releja za slučaj kvara unutar štićenog područja i napajanja s jedne strane

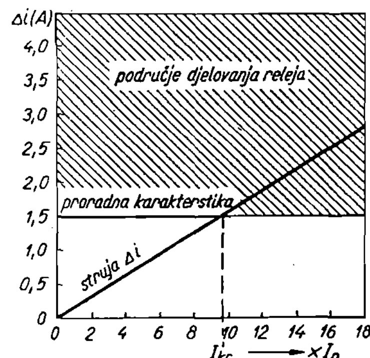
U slučaju kratkog spoja unutar štićenog područja (sl. 7.73. i 7.74) struje kroz diferencijalni relej vrlo su velike, pa pogreške strujnih transformatora ne utječu na djelovanje releja. Pri napajanju s jedne strane (sl. 7.73), struja kroz diferencijalni relej (Δ **i**) bit će praktički jednaka sekundarnoj struji na strani napajanja ($\mathbf{i}_1$), jer sekundarni namot drugog strujnog transformatora ima, u usporedbi s namotom releja, vrlo veliku impedanciju (Z_2).



Slika 7.74. Struje u krugu diferencijalnog releja za slučaj kvara unutar štićenog područja i napajanja s obje strane

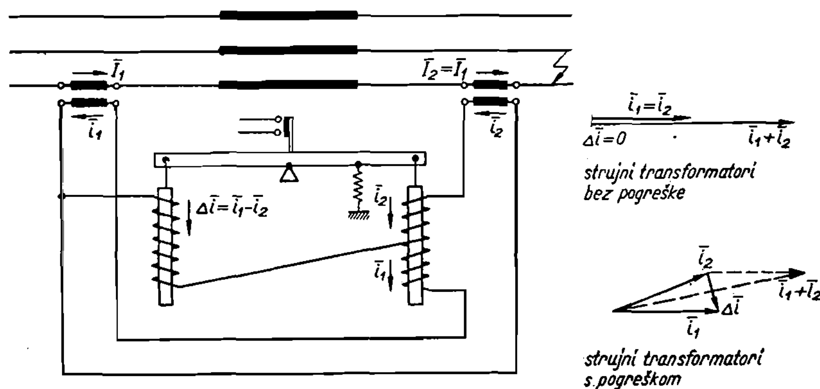
Prema tome naročitu pažnju treba obratiti na opasnosti od pogrešnog djelovanja kad kvar nastane izvan štićenog područja. Da se to spriječi, relej treba udesiti da djeluje kad struja postigne ili prekorači neku, **ne**

suviše nisku, vrijednost. Proradna struja, na koju se obično udešava diferencijalni relej, iznosi 30% do 50% nazivne sekundarne struje strujnog transformatora (dakle između 1,5 i 2,5 A, ako je nazivna struja 5 A). Proradna struja konstantna je i neovisna o primarnoj struji, dok je struja $\Delta \mathbf{i}$, za kvar izvan štićenog područja, približno proporcionalna primarnoj struji (sl. 7.75). Ako je $\Delta \mathbf{i}$ veća od proradne struje relej će djelovati, iako je



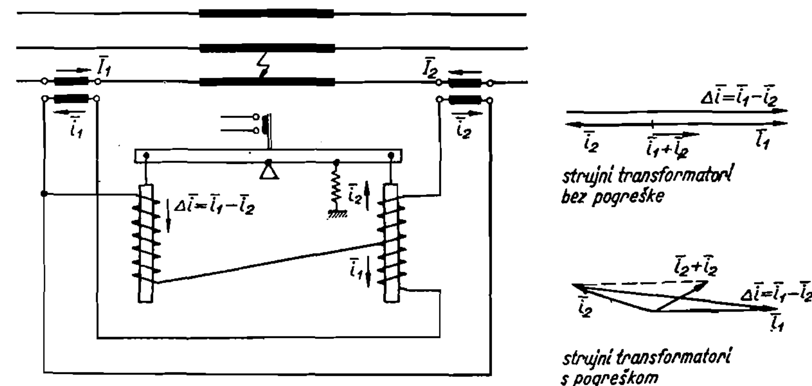
Slika 7.75. Radna karakteristika diferencijalnog releja (struja Δi za kvar izvan štićenog područja)

kvar nastao izvan štićenog područja. To će se dogoditi releju s radnom karakteristikom sa sl. 7.75, ako je primarna struja veća od I_{kr}. Da bi se spriječilo pogrešno djelovanje zaštite ako se pojavljuju struje kratkog spoja veće od I_{kr}, potrebno je povećati proradnu struju, što smanjuje vrijednost zaštite.



Slika 7.76. Struje u krugu stabiliziranog diferencijalnog releja za slučaj kvara izvan štićenog područja

Da se izbjegne opasnost od krivog djelovanja, izvode se stabilizirani diferencijalni releji, u kojima postoje dva strujna sistema: jedan kroz koji protječe diferencija struja ($\Delta \mathbf{i}$), i drugi kroz koji protječe suma struja (sl. 7.76. i 7.77). Takav relej može se izvesti u obliku vage. Do zakretanja poluge, odnosno zatvaranja kontakata releja, dolazi ako moment proizveden

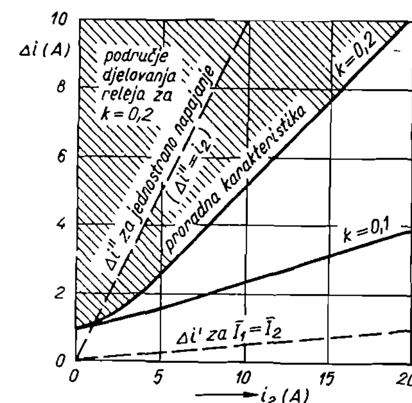


Slika 7.77. Struje u krugu stabiliziranog diferencijalnog releja za slučaj kvara unutar štićenog područja

strujom $\Delta \mathbf{i}$ prevlada moment proizveden zbrojem struja $\mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2$ i silom pera. Budući da su sile proporcionalne kvadratima tokova, a tokovi su proporcionalni strujama kroz svitke, za uvjet ravnoteže može se postaviti

$$(k\,|\,\mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2\,|)^2 - \Delta\,\mathbf{i}^2 + C = 0 \qquad \ldots (7.94)$$

gdje je k konstanta koja se može po volji odabrati promjenom broja zavoja, izborom duljine krakova vage ili veličine zračnog raspora, a C sila pera koja u (7.94) ima dimenziju A^2. Ako je npr. $C = 1$, znači da će



Slika 7.78. Primjer proradne karakteristike stabiliziranog diferencijalnog releja ($C = 1$)

pero držati ravnotežu sili svitka kroz koji protječe struja $\Delta i = 1$, uz uvjet da kroz ostale svitke struja ne teče. Uzevši u obzir (7.93), može se (7.94) napisati u obliku

$$(k\,|\,2\,\mathbf{i}_2 + \Delta\,\mathbf{i}\,|)^2 - \Delta\,\mathbf{i}^2 + C = 0 \qquad \ldots (7.95)$$

Ta relacija predstavlja jednadžbu proradne karakteristike stabiliziranog diferencijalnog releja (sl. 7.78). Uz proradnu karakteristiku ucrtana je

struja $\Delta i'$, koja je posljedica pogreške strujnih transformatora pri kvaru izvan štićenog područja ($\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2$), te struja $\Delta i''$ pri kvaru unutar štićenog područja, ali za slučaj napajanja s jedne strane. Vidi se da neće doći do djelovanja releja pri kvaru izvan štićenog područja, dok će relej djelovati za slučaj kvara unutar njega i u slučaju napajanja samo s jedne strane.

B. Izvedbe diferencijalnih releja

Najstarija izvedba osniva se na principu vage, kako je prikazano na sl. 7.76. i 7.77.

U novijim izvedbama diferencijalni relej uključen je u dijagonalu istosmjernog mosta (sl. 7.79). Jednadžba ravnoteže sada glasi

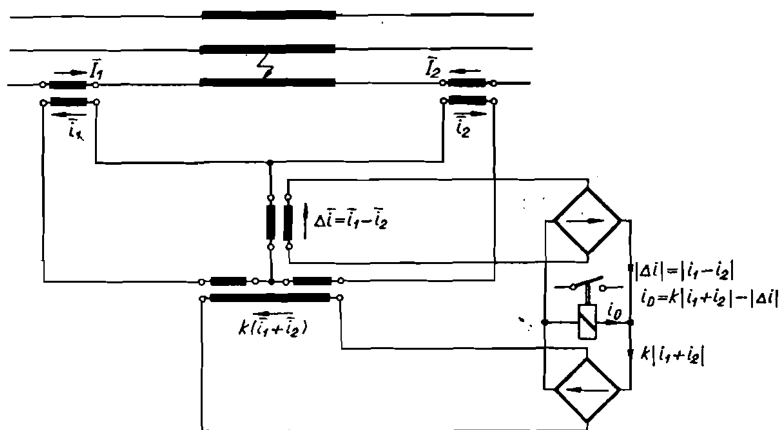
$$k\,|\,i_1 + i_2\,| - \Delta i + C = 0 \qquad \ldots (7.96)$$

gdje je C opet sila pera (izražena u A) koja se protivi zatvaranju kontakta releja. Konstantu k može se ostvariti izborom pogodnog prijenosnog omjera pomoćnog strujnog transformatora ili uz isti prijenosni omjer pomoćnih strujnih transformatora pomoću releju paralelno spojenih otpora (sl. 7.80). Tada je konstanta $k = r_1/(r_1 + r_2)$, jer s tim omjerom treba množiti zbroj struja da se dobije dio toga zbroja koji protječe kroz relej. Uzimajući u obzir (7.93) iz (7.96) dolazimo do jednadžbe proradne karakteristike releja

$$k\,|\,2\,i_2 + \Delta i\,| - \Delta i + C = 0 \qquad \ldots (7.97)$$

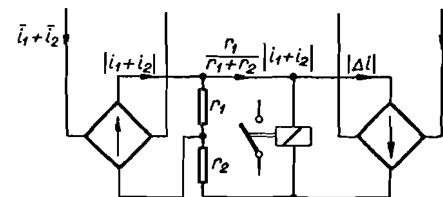
Na sl. 7.81. prikazane su proradne karakteristike za $C = 1$, $k = 0{,}1$ i $k = 0{,}2$. Proradne karakteristike imaju u načelu ista svojstva kao i karakteristike releja na principu vage.

Druga izvedba (sl. 7.82) osniva se na usporedbi magnetskih tokova proizvedenih sekundarnim strujama strujnih transformatora. Pomična



Slika 7.79. Priključak stabiliziranog diferencijalnog releja izvedenog kao most istosmjerne struje

kotva, kroz čiji namot protječe struja jednog strujnog transformatora (i_2), može se zakretati između dva pola uzbuđena strujom drugog strujnog transformatora (i_1). U lijevom zračnom rasporu protječe zbroj tokova

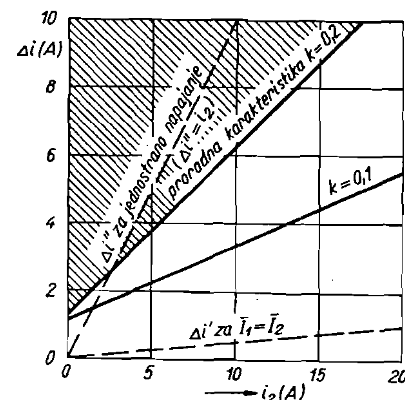


Slika 7.80. Spoj stabiliziranog diferencijalnog releja u mostu istosmjerne struje s paralelno spojenim otporima

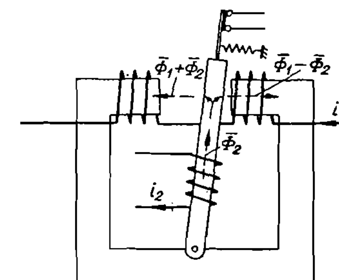
($\Phi_1 + \Phi_2$), a u desnom njihova razlika ($\Phi_1 - \Phi_2$). Sile koje djeluju na kotvu proporcionalne su kvadratu tokova u zračnom rasporu, pa jednadžba ravnoteže glasi

$$k^2\,|\,\Phi_1 + \Phi_2\,|^2 - |\,\Phi_1 - \Phi_2\,|^2 - C = 0 \qquad \ldots (7.98)$$

Veličina C, koja je proporcionalna sili pera, ima negativan predznak, jer sila pera djeluje u istom smjeru kao i razlika tokova. Konstanta k ovisi



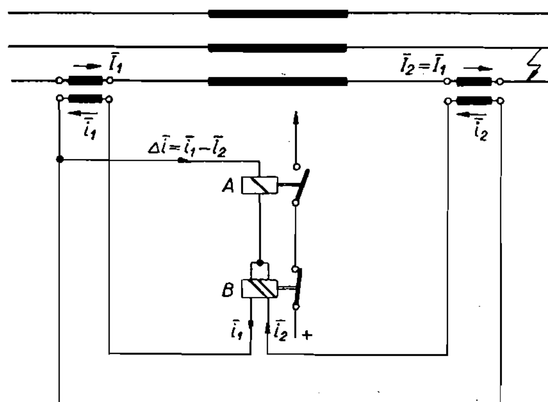
Slika 7.81. Primjer proradne karakteristike stabiliziranog diferencijalnog releja u mostu istosmjerne struje



Slika 7.82. Principijelni prikaz diferencijalnog releja s usporedbom magnetskih tokova

o razlici zračnih raspora između kotve i polova. Kontakt releja je mirni kontakt, koji se otvara kad prevlada sila na strani sume tokova, a ostat će zatvoren ako jedna od struja postane jednaka nuli, što se događa u slučaju kvara štićenog područja pri napajanju s jedne strane. Zbog toga se relej s usporedbom magnetskih tokova ne može upotrijebiti s radnim kontaktom. Izvedba releja s mirnim kontaktom nije dovoljna za zaštitu, pa se u seriju s takvim kontaktom spaja radni kontakt nadstrujnog releja

(sl. 7.83) s proradnom strujom od npr. 20% nazivne struje. U slučaju kvara izvan štićenog područja doći će, radi velikih struja i greške strujnih transformatora, do djelovanja nadstrujnog releja (A na sl. 7.83), ali zbog velike vrijednosti sume tokova otvorit će se mirni kontakt releja B, pa do djelovanja zaštite neće doći.



Slika 7.83. Shema spoja diferencijalnog releja s usporedbom magnetskih tokova (B) (A-nadstrujni relej)

Stabilizirani diferencijalni relej može se izvesti i kao transduktorski relej, u kojemu se ovisnost o sumi struja ($\mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2$) postiže predmagnetiziranjem željezne jezgre s ispravljenom sumom struja. Diferencija struja $\Delta\mathbf{i}$ mora najprije savladati predmagnetiziranje, da bi transformatorski djelovala na relej preko njegova namota. Poželjna proradna karakteristika postiže se izborom povoljnog broja zavoja namotâ.

C. Diferencijalna zaštita transformatora

a) Općenito

Prikazano djelovanje diferencijalne zaštite vrijedi za prilike koje vladaju kad se diferencijalnim relejem štiti generator ili vod. Diferencijalni relej može se međutim upotrijebiti i za zaštitu transformatora, pa se tada moraju uzeti u obzir prilike koje vladaju u tom slučaju.

U prvom redu treba imati u vidu da su primarne struje kroz strujne transformatore, koji su postavljeni na obje strane štićenog transformatora, obrnuto proporcionalne prijenosnom omjeru transformatora. Drugo, kako se radi o različitim naponima, strujni transformatori su različite izvedbe, pa ne mogu imati ni iste karakteristike. Treće, usporedba struja primarnog i sekundarnog namota transformatora otežana je zbog pomaka u fazi među strujama. I konačno četvrto, u regulacionim transformatorima mijenja se za vrijeme pogona prijenosni omjer, koji utječe na odnos struja kroz strujne transformatore. Sve to otežava upotrebu diferencijalne zaštite.

No pogodnom izvedbom i upotrebom stabiliziranih diferencijalnih releja može se transformator efikasno zaštititi diferencijalnom zaštitom.

Na djelovanje diferencijalne zaštite utječe i struja magnetiziranja i pojave neposredno nakon uklapanja transformatora, što će biti posebno razmotreno.

b) Struje kratkog spoja kroz transformator

Spoj diferencijalne zaštite transformatora treba odabrati tako da se eliminira fazni pomak koji postoji među strujama kroz primarne namote strujnih transformatora, da ne bi došlo do pogrešnog djelovanja u normalnom pogonu i pri kratkom spoju izvan štićenog područja. Izvedba ovisi o spoju transformatora, pa je potrebno razmotriti taj utjecaj na prilike u normalnom pogonu i za vrijeme kratkog spoja.

Pri tropolnom kratkom spoju imamo s obzirom na fazni pomak struja iste prilike kao u normalnom pogonu, pa ih nije ni potrebno posebno razmatrati. To vrijedi za bilo kakav spoj transformatora.

U transformatoru sa spojem zvijezda-zvijezda pojavljuju se struje u istim fazama i na primarnom i na sekundarnom namotu. Struje su u odgovarajućim fazama ili u fazi ili u protufazi, što ovisi o grupi spoja (Yy0 ili Yy6). Osim toga omjer veličina struja obrnuto je proporcionalan prijenosnom omjeru.

Tako jednostavni odnosi međutim ne postoje u transformatoru u spoju zvijezda-trokut, a ni u transformatoru zvijezda-zvijezda, s tercijarnim namotom spojenim u trokut, pa je potrebno razmotriti prilike u takvim transformatorima u slučaju dvopolnog i jednopolnog kratkog spoja.

Za dvopolni kratki spoj neposredno uz priključnice vrijedi $\mathbf{I}_d = -\mathbf{I}_i$ i $\mathbf{I}_o = 0$, odnosno upotrebom oznaka sa sl. 7.84.

$$\mathbf{I}_{2d} = -\mathbf{I}_{2i} \qquad \ldots (7.99a)$$

$$\mathbf{I}_{2o} = 0 \qquad \ldots (7.99b)$$

Iz toga slijedi za struje u fazama

$$\mathbf{I}_{R2} = \mathbf{I}_{2d} + \mathbf{I}_{2i} + \mathbf{I}_{2o} = 0 \qquad \ldots (7.100a)$$

$$\mathbf{I}_{S2} = a^2\,\mathbf{I}_{2d} + a\,\mathbf{I}_{2i} + \mathbf{I}_{2o} = (a^2 - a)\,\mathbf{I}_{2d} = -j\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.100b)$$

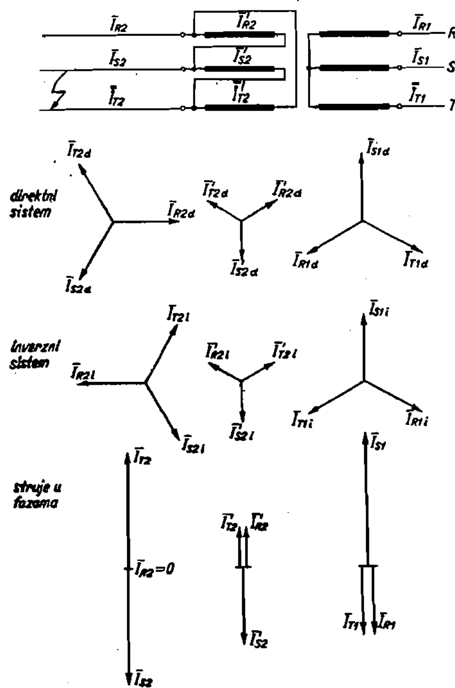
$$\mathbf{I}_{T2} = a\,\mathbf{I}_{2d} + a^2\,\mathbf{I}_{2i} + \mathbf{I}_{2o} = -(a^2 - a)\,\mathbf{I}_{2d} = j\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.100c)$$

Prema izloženome u trećem poglavlju, struje direktnog sistema u namotima spojenim u trokut (sl. 7.84) dobivaju se iz relacija

$$\mathbf{I}_{R2d}' = \frac{1}{3}\,(\mathbf{I}_{R2d} - \mathbf{I}_{S2d}) = \frac{1}{3}\,(1 - a^2)\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.101a)$$

$$\mathbf{I}_{S2d}' = \frac{1}{3}\,(\mathbf{I}_{S2d} - \mathbf{I}_{T2d}) = \frac{1}{3}\,(a^2 - a)\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.101b)$$

$$\mathbf{I}_{T2d}' = \frac{1}{3}\,(\mathbf{I}_{T2d} - \mathbf{I}_{R2d}) = \frac{1}{3}\,(a - 1)\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.101c)$$



Slika 7.84. Struje u transformatoru zvijezda—trokut u slučaju dvopolnog kratkog spoja na strani namota spojenog u trokut (spoj Dy5 odnosno Yd7)

dok su struje inverznog sistema, uzimajući u obzir i relaciju (7.99a)

$$\mathbf{I}_{R2i}' = \frac{1}{3}\,(\mathbf{I}_{R2i} - \mathbf{I}_{S2i}) = \frac{1}{3}\,(a-1)\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.102a)$$

$$\mathbf{I}_{S2i}' = \frac{1}{3}\,(\mathbf{I}_{S2i} - \mathbf{I}_{T2i}) = \frac{1}{3}\,(a^2-a)\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.102b)$$

$$\mathbf{I}_{T2i}' = \frac{1}{3}\,(\mathbf{I}_{T2i} - \mathbf{I}_{R2i}) = \frac{1}{3}\,(1-a^2)\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.102c)$$

Prema tome su struje u pojedinim namotima spojenim u trokut

$$\mathbf{I}_{R2}' = \frac{1}{3}\,(1-a^2)\,\mathbf{I}_{2d} + \frac{1}{3}\,(a-1)\,\mathbf{I}_{2d} = \frac{1}{3}\,(a-a^2)\,\mathbf{I}_{2d} = j\,\frac{\sqrt{3}}{3}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.103a)$$

$$\mathbf{I}_{S2}' = \frac{2}{3}\,(a^2-a)\,\mathbf{I}_{2d} = -j\,2\,\frac{\sqrt{3}}{3}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.103b)$$

$$\mathbf{I}_{T2}' = \frac{1}{3}\,(a-1)\,\mathbf{I}_{2d} + \frac{1}{3}\,(1-a^2)\,\mathbf{I}_{2d} = \frac{1}{3}\,(a-a^2)\,\mathbf{I}_{2d} = j\,\frac{\sqrt{3}}{3}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.103c)$$

Teo Klepo

Struje u namotu spojenom u zvijezdu određujemo bilo pomoću simetričnih komponenata, bilo neposredno iz struja u namotima. U svakom slučaju treba uzeti u obzir da su struje u zvijezdi za $\sqrt{3}$ veće nego u trokutu, te da imaju suprotan smjer (uz pretpostavku istog smjera motanja!). Polazeći od simetričnih komponenata dobivamo za struje direktnog sistema, uz pretpostavku da je prijenosni omjer 1 : 1

$$\mathbf{I}_{R1d} = -\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{R2d}' = \frac{\sqrt{3}}{3}\,(a^2-1)\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.104a)$$

$$\mathbf{I}_{S1d} = -\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{S2d}' = \frac{\sqrt{3}}{3}\,(a-a^2)\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.104b)$$

$$\mathbf{I}_{T1d} = -\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{T2d}' = \frac{\sqrt{3}}{3}\,(1-a)\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.104c)$$

dok za struje inverznog sistema vrijedi

$$\mathbf{I}_{R1i} = -\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{R2i}' = \frac{\sqrt{3}}{3}\,(1-a)\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.105a)$$

$$\mathbf{I}_{S1i} = -\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{S2i}' = \frac{\sqrt{3}}{3}\,(a-a^2)\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.105b)$$

$$\mathbf{I}_{T1i} = -\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{T2i}' = \frac{\sqrt{3}}{3}\,(a^2-1)\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.105c)$$

Zbrajanjem komponenata struja dobivamo struje u fazama

$$\mathbf{I}_{R1} = \frac{\sqrt{3}}{3}\,(a^2-1)\,\mathbf{I}_{2d} + \frac{\sqrt{3}}{3}\,(1-a)\,\mathbf{I}_{2d} = \frac{\sqrt{3}}{3}\,(a^2-a)\,\mathbf{I}_{2d} = -j\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.106a)$$

$$\mathbf{I}_{S1} = \frac{\sqrt{3}}{3}\,(a-a^2)\,\mathbf{I}_{2d} + \frac{\sqrt{3}}{3}\,(a-a^2)\,\mathbf{I}_{2d} = 2\,\frac{\sqrt{3}}{3}\,(a-a^2)\,\mathbf{I}_{2d} = j\,2\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.106b)$$

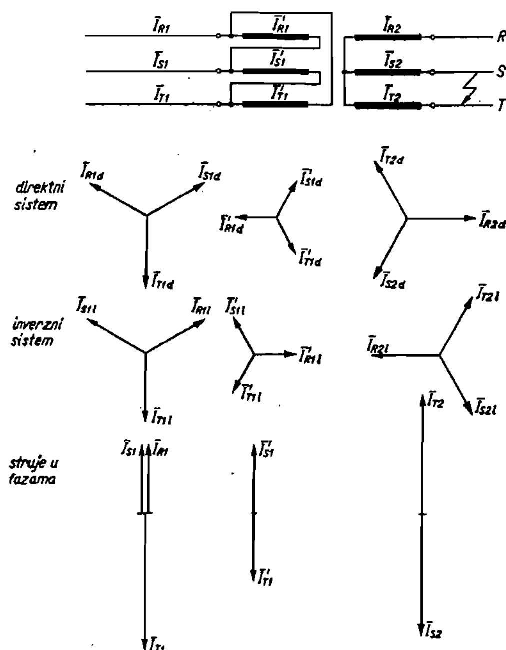
$$\mathbf{I}_{T1} = \frac{\sqrt{3}}{3}\,(1-a)\,\mathbf{I}_{2d} + \frac{\sqrt{3}}{3}\,(a^2-1)\,\mathbf{I}_{2d} = \frac{\sqrt{3}}{3}\,(a^2-a)\,\mathbf{I}_{2d} = -j\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.106c)$$

Do istog rezultata bismo došli polazeći od struje u namotima trokuta, a koristeći relacije (7.103).

Na sl. 7.84. prikazane su komponente struja i struje u fazama, do kojih se može doći i grafičkom konstrukcijom.

Za dvopolni kratki spoj na strani zvijezde (sl. 7.85) polazi se od istih uvjeta (7.99), a struje u namotima spojenim u trokut dobivaju se iz relacije

$$\mathbf{I}_{R1d}' = -\frac{1}{\sqrt{3}}\,\mathbf{I}_{R2d} \qquad \ldots (7.107)$$



Slika 7.85. Struje u transformatoru zvijezda—trokut u slučaju dvopolnog kratkog spoja na strani namota spojenog u zvijezdu (spoj Dy5 odnosno Yd7)

odnosno iz analognih izraza, dok su struje u vodovima priključenim na namot spojen u trokut

$$\mathbf{I}_{R1d} = \mathbf{I}_{R1d}{}' - \mathbf{I}_{T1d}{}' \qquad \ldots (7.108a)$$

$$\mathbf{I}_{S1d} = \mathbf{I}_{S1d}{}' - \mathbf{I}_{R1d}{}' \qquad \ldots (7.108b)$$

$$\mathbf{I}_{T1d} = \mathbf{I}_{T1d}{}' - \mathbf{I}_{S1d}{}' \qquad \ldots (7.108c)$$

Analogno vrijedi za inverzni sistem struja. Struje u namotima i struje u priključnim vodovima određuju se na već opisani način.

Struje u namotu spojenom u zvijezdu iznose

$$\mathbf{I}_{R2} = 0 \qquad \ldots (7.109a)$$

$$\mathbf{I}_{S2} = -j\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.109b)$$

$$\mathbf{I}_{T2} = j\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.109c)$$

struje u namotu spojenom u trokut

$$\mathbf{I}_{R1}{}' = 0 \qquad \ldots (7.110a)$$

$$\mathbf{I}_{S1}{}' = j\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.110b)$$

$$\mathbf{I}_{T1}{}' = -j\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.110c)$$

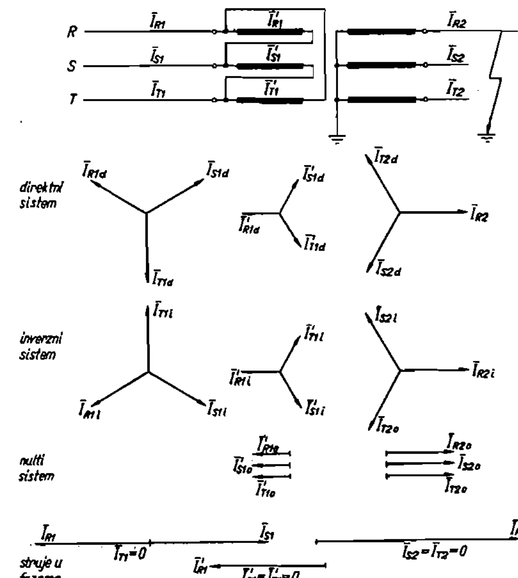
dok su struje u vodovima priključenim na trokut

$$\mathbf{I}_{R1} = j\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.111a)$$

$$\mathbf{I}_{S1} = j\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.111b)$$

$$\mathbf{I}_{T1} = -j\,2\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.111c)$$

Za jednopolni kratki spoj (sl. 7.86) polazi se od uvjeta $\mathbf{I}_{2d}' = \mathbf{I}_{2i} = \mathbf{I}_{2o}$. Struje u namotima spojenim u trokutu određuju se prema (7.107), a u vodovima priključenim na namote spojene u trokut prema (7.108).



Slika 7.86. Struje u transformatoru zvijezda—trokut u slučaju jednopolnog kratkog spoja na strani namota spojenog u zvijezdu (spoj Dy5 odnosno Yd7)

Struje u namotu spojenom u zvijezdu iznose

$$\mathbf{I}_{R2} = 3\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.112a)$$

$$\mathbf{I}_{S2} = \mathbf{I}_{T2} = 0 \qquad \ldots (7.112b)$$

struje unutar trokuta

$$\mathbf{I}_{R1}{}' = -\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.113a)$$

$$\mathbf{I}_{S1}{}' = \mathbf{I}_{T1}{}' = 0 \qquad \ldots (7.113b)$$

dok su struje u vodovima priključenim na namot spojen u trokut

$$\mathbf{I}_{R1} = -\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.114a)$$

$$\mathbf{I}_{S1} = \sqrt{3}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.114b)$$

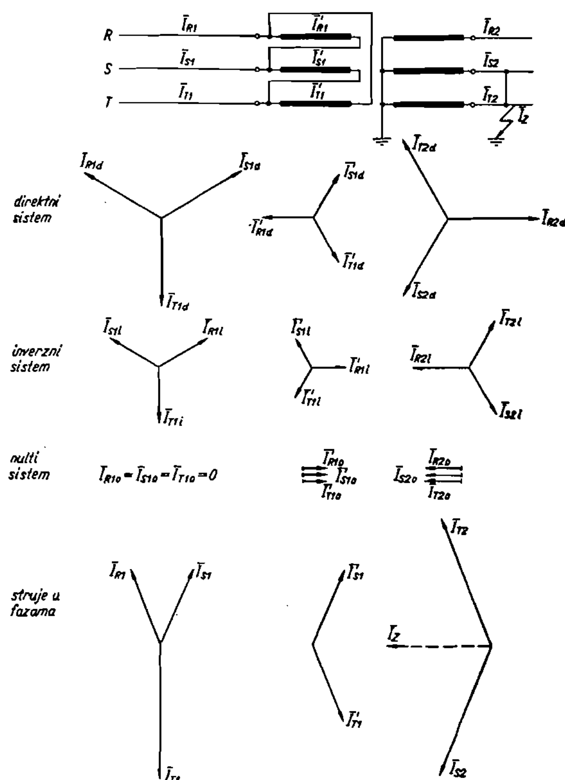
$$\mathbf{I}_{T1} = 0 \qquad \ldots (7.114c)$$

Pri dvopolnom kratkom spoju s istodobnim spojem sa zemljom na strani namota spojenog u zvijezdu (sl. 7.87), na mjestu kratkog spoja ispunjen je uvjet $\mathbf{I}_d + \mathbf{I}_i + \mathbf{I}_o = 0$. S obzirom na odnose izvedene u trećem poglavlju, može se za inverznu i nultu komponentu struja postaviti

$$\mathbf{I}_{2i} = -\frac{\mathbf{Z}_o}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.115a)$$

$$\mathbf{I}_{2o} = -\frac{\mathbf{Z}_i}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.115b)$$

I sada struje u namotima spojenim u trokut određujemo prema (7.107), a u vodovima priključenim na trokut prema (7.108). Struje u fazama namota spojenog u zvijezdu iznose



Slika 7.87. Struje u transformatoru zvijezda—trokut u slučaju dvopolnog kratkog spoja s istodobnim spojem sa zemljom na strani namota spojenog u zvijezdu (spoj Dy5 odnosno Yd7)

$$\mathbf{I}_{R2} = 0 \qquad \ldots (7.116a)$$

$$\mathbf{I}_{S2} = -\frac{1}{2}\frac{\mathbf{I}_{2d}}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\left[3\,\mathbf{Z}_i + j\sqrt{3}\,(\mathbf{Z}_i + 2\,\mathbf{Z}_o)\right] \qquad \ldots (7.116b)$$

$$\mathbf{I}_{T2} = -\frac{1}{2}\frac{\mathbf{I}_{2d}}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\left[3\,\mathbf{Z}_i - j\sqrt{3}\,(\mathbf{Z}_i + 2\,\mathbf{Z}_o)\right]' \qquad \ldots (7.116c)$$

struje unutar trokuta

$$\mathbf{I}_{R1}' = 0 \qquad \ldots (7.117a)$$

$$\mathbf{I}_{S1}' = \frac{1}{2}\frac{\mathbf{I}_{2d}}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\left[\sqrt{3}\,\mathbf{Z}_i + j\,(\mathbf{Z}_i + 2\mathbf{Z}_o)\right] \qquad \ldots (7.117b)$$

$$\mathbf{I}_{T1}' = \frac{1}{2}\frac{\mathbf{I}_{2d}}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\left[\sqrt{3}\,\mathbf{Z}_i - j\,(\mathbf{Z}_i + 2\,\mathbf{Z}_o)\right] \qquad \ldots (7.117c)$$

dok su struje u vodovima priključenim na trokut

$$\mathbf{I}_{R1} = -\frac{1}{2}\frac{\mathbf{I}_{2d}}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\left[\sqrt{3}\,\mathbf{Z}_i - j\,(\mathbf{Z}_i + 2\,\mathbf{Z}_o)\right] \qquad \ldots (7.118a)$$

$$\mathbf{I}_{S1} = \frac{1}{2}\frac{\mathbf{I}_{2d}}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\left[\sqrt{3}\,\mathbf{Z}_i + j\,(\mathbf{Z}_i + 2\,\mathbf{Z}_o)\right] \qquad \ldots (7.118b)$$

$$\mathbf{I}_{T1} = -j\,\mathbf{I}_{2d}\frac{\mathbf{Z}_i + 2\,\mathbf{Z}_o}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o} \qquad \ldots (7.118c)$$

Pri određivanju struja u transformatoru zvijezda-zvijezda s tercijarnim namotom spojenim u trokut (bez izvoda), treba uzeti u obzir da struje direktnog i inverznog sistema ne mogu teći u namotu spojenom u trokut (jer mora biti $\mathbf{I}_{R3} = \mathbf{I}_{S3} = \mathbf{I}_{T3}$), te da struje nultog sistema ne mogu teći u namotu spojenom u zvijezdu s izoliranom nul-tačkom (jer tada mora biti $\mathbf{I}_R + \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_T = 0$, što nije ispunjeno za nulti sistem struja).

Ako dakle nastane tropolni ili dvopolni kratki spoj, kroz tercijarni namot neće teći struje, jer ne postoji nulti sistem struja. Struje u primarnim namotima imat će istu apsolutnu vrijednost (uz pretpostavku da je prijenosni omjer 1 : 1), uz suprotan smjer od struja u sekundarnim namotima, pa te vrste kratkih spojeva nije potrebno posebno razmotriti.

Prilike pri jednopolnom kratkom spoju na transformatoru zvijezda-zvijezda s tercijarnim namotom prikazane su na sl. 7.88. Polazeći od uvjeta $\mathbf{I}_{2d} = \mathbf{I}_{2i} = \mathbf{I}_{2o}$, komponente struja u primarnom namotu iznose

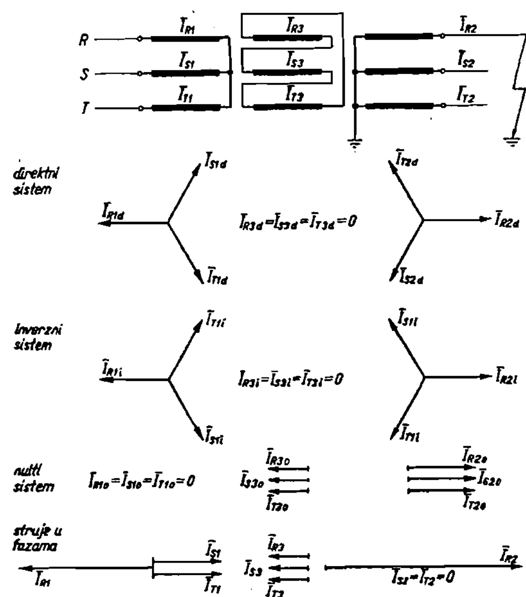
$$\mathbf{I}_{1d} = -\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.119a)$$

$$\mathbf{I}_{1i} = -\mathbf{I}_{2i} = -\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.119b)$$

$$\mathbf{I}_{1o} = 0 \qquad \ldots (7.119c)$$

dok su u tercijarnom namotu komponente struja

$$\mathbf{I}_{3d} = \mathbf{I}_{3i} = 0 \qquad \ldots (7.120a)$$



Slika 7.88. Struje u transformatoru zvijezda—zvijezda s tercijarnim namotom spojenim u trokut u slučaju jednopolnog kratkog spoja (spoj Yy0)

$$\mathbf{I}_{3o} = -\frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{I}_{2o} = -\frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{I}_{2d} \qquad \text{. . . (7.120b)}$$

Struje u sekundarnom namotu iznose

$$\mathbf{I}_{R2} = 3\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \text{. . . (7.121a)}$$

$$\mathbf{I}_{S2} = \mathbf{I}_{T2} = 0 \qquad \text{. . . (7.122b)}$$

u tercijarnom namotu

$$\mathbf{I}_{R3} = \mathbf{I}_{S3} = \mathbf{I}_{T3} = -\frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{I}_{2d} \qquad \text{. . . (7.123)}$$

dok su u primarnom namotu

$$\mathbf{I}_{R1} = -2\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \text{. . . (7.124a)}$$

$$\mathbf{I}_{S1} = \mathbf{I}_{T1} = \mathbf{I}_{2d} \qquad \text{. . . (7.124b)}$$

Pri dvopolnom kratkom spoju s istodobnim spojem sa zemljom (sl. 7.89) komponente struja u sekundarnom namotu određene su relacijama (7.115); komponente struja u tercijarnom namotu iznose

$$\mathbf{I}_{3d} = \mathbf{I}_{3i} = 0 \qquad \text{. . . (7.125a)}$$

$$\mathbf{I}_{3o} = -\frac{1}{\sqrt{3}}\mathbf{I}_{2o} = \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{\mathbf{Z}_i}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\mathbf{I}_{2d} \qquad \text{. . . (7.125b)}$$

dok su komponente struja u primarnom namotu

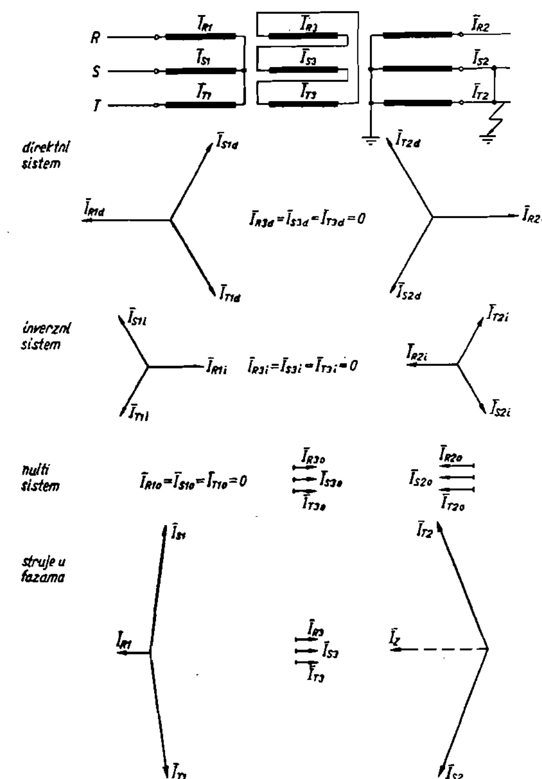
$$\mathbf{I}_{1d} = -\mathbf{I}_{2d} \qquad \text{. . . (7.126a)}$$

$$\mathbf{I}_{1i} = -\mathbf{I}_{2i} = \frac{\mathbf{Z}_o}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\mathbf{I}_{2d}, \qquad \text{. . . (7.126b)}$$

$$\mathbf{I}_{1o} = 0 \qquad \text{. . . (7.126c)}$$

Struje u fazama sekundarnog namota određene su izrazima (7.116), a struje su u fazama tercijarnog namota

$$\mathbf{I}_{R3} = \mathbf{I}_{S3} = \mathbf{I}_{T3} = \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{\mathbf{Z}_i}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\mathbf{I}_{2d} \qquad \text{. . . (7.127)}$$



Slika 7.89. Struje u transformatoru zvijezda-zvijezda s tercijarnim namotom spojenim u trokut u slučaju dvopolnog kratkog spoja s istodobnim spojem sa zemljom (spoj Yy0)

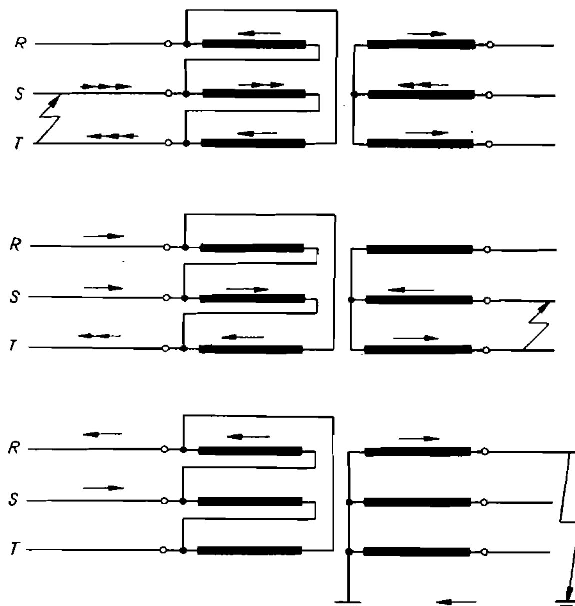
dok su struje u primarnom namotu

$$\mathbf{I}_{R1} = -\frac{\mathbf{Z}_i}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.128a)$$

$$\mathbf{I}_{S1} = \frac{1}{2}\,\frac{\mathbf{I}_{2d}}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\,[\mathbf{Z}_i + j\sqrt{3}\,(\mathbf{Z}_i + 2\,\mathbf{Z}_o)] \qquad \ldots (7.128b)$$

$$\mathbf{I}_{T1} = \frac{1}{2}\,\frac{\mathbf{I}_{2d}}{\mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_o}\,[\mathbf{Z}_i - j\sqrt{3}\,(\mathbf{Z}_i + 2\,\mathbf{Z}_o)] \qquad \ldots (7.128c)$$

U slučaju dvopolnih (sl. 7.84. i 7.85) i jednopolnih kratkih spojeva sl. 7.86. i 7.88) struje u svim namotima ili su u fazi ili su zakrenute za 180°, pa se one mogu jednostavno prikazati pomoću strelica. Na sl. 7.90. prikazane su struje u transformatoru zvijezda-trokut, a na sl. 7.91. u transformatoru zvijezda-zvijezda s tercijarnim namotom spojenim u trokut. Broj strelica predstavlja višekratnik veličine struja u odnosu na struje u istoj shemi uvaživši pri tome prijenosni omjer transformatora. Prikazivanje pomoću strelica može znatno povećati preglednost prilika za vrijeme kratkog spoja.



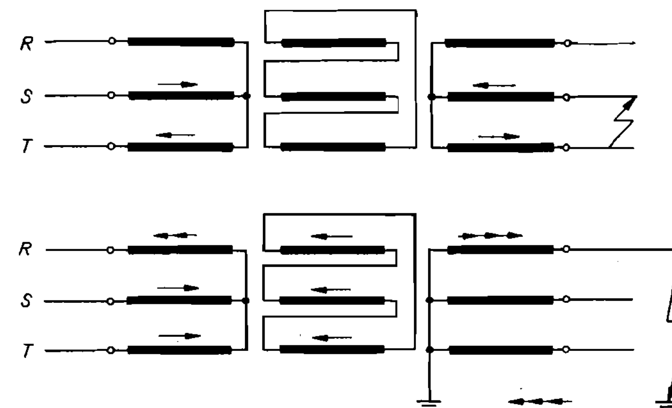
Slika 7.90. Pojednostavnjeni prikaz struja kratkog spoja u transformatoru zvijezda—trokut

c) Diferencijalna zaštita dvonamotnih transformatora

Spoj strujnih transformatora za priključak diferencijalne zaštite treba tako odabrati da sekundarne struje na obje strane učinskog transformatora

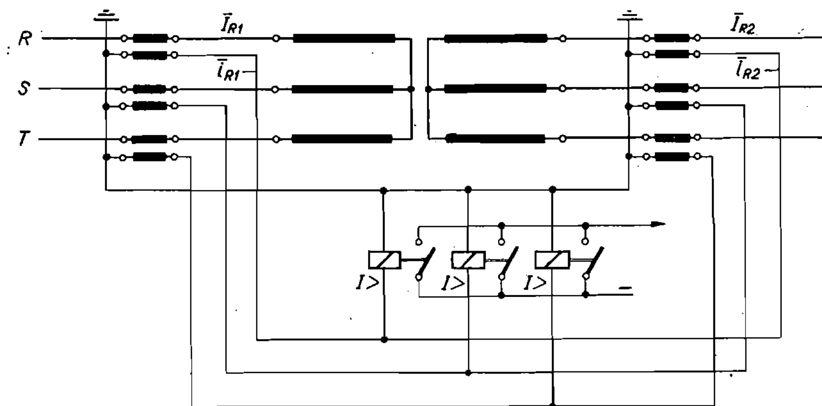
budu međusobno jednake i u fazi, jer samo je tada moguće ispravno funkcioniranje diferencijalnog releja.

Odredimo potrebne prijenosne omjere strujnih transformatora, koji će osigurati jednakost struja i kontrolirajmo njihove spojeve, koji moraju osigurati ispravan fazni pomak struja. Pri tome ćemo zanemariti struje magnetiziranja, jer diferencijalna zaštita nije tako osjetljivo udešena.



Slika 7.91. Pojednostavnjeni prikaz struja kratkog spoja u transformatoru zvijezda—zvijezda s tercijarnim namotom spojenim u trokut

Za zaštitu transformatora u spoju zvijezda-zvijezda (sl. 7.92) diferencijalni releji spajaju se na sekundarne namote strujnih transformatora, koji su spojeni u zvijezdu. Zamislimo da je na sekundarnoj stani transformatora sa sl. 7.92. nastao tropolni kratki spoj (odnosno da je trans-



Slika 7.92. Shema spoja diferencijalne zaštite transformatora zvijezda—zvijezda bez međutransformatora

formator simetrično opterećen). Tada je struja faze R na sekundarnoj strani $\mathbf{I}_{R2}$, dok je struja u sekundarnom namotu strujnog transformatora

$$\mathbf{i}_{R2} = \frac{\mathbf{I}_{R2}}{p_2} \qquad \ldots (7.129)$$

gdje je p_2 prijenosni omjer strujnog transformatora na sekundarnoj strani učinskog transformatora

$$p_2 = \frac{I_{n2}}{i_{n2}} \qquad \ldots (7.130)$$

U primarnom namotu učinskog transformatora teče struja

$$\mathbf{I}_{R1} = \frac{\mathbf{I}_{R2}}{p} \qquad \ldots (7.131)$$

ako je p prijenosni omjer učinskog transformatora

$$p = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} \qquad \ldots (7.132)$$

dok u sekundarnom namotu strujnog transformatora, na primarnoj strani učinskog transformatora, teče struja

$$\mathbf{i}_{R1} = \frac{\mathbf{I}_{R1}}{p_1} = \frac{\mathbf{I}_{R2}}{pp_1} \qquad \ldots (7.133)$$

gdje je p_1 prijenosni omjer strujnog transformatora na primarnoj strani

$$p_1 = \frac{I_{n1}}{i_{n1}} \qquad \ldots (7.134)$$

Iz uvjeta $\mathbf{i}_{R1} = \mathbf{i}_{R2}$ slijedi

$$\frac{p_2}{p_1} = p \qquad \ldots (7.135)$$

odnosno, kad su $i_{n1} = i_{n2}$, što je normalno slučaj

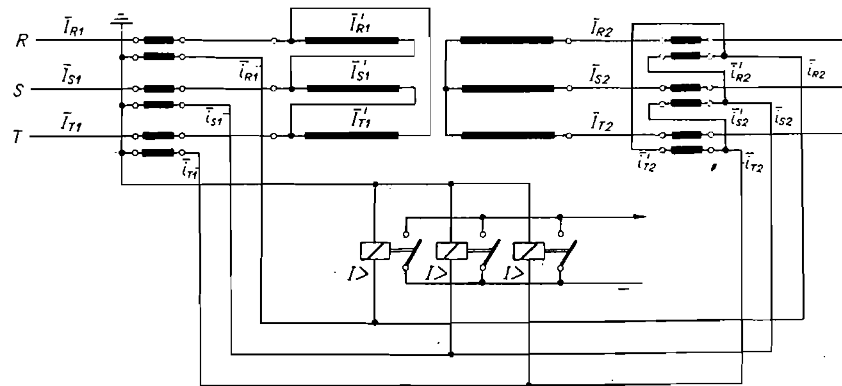
$$\frac{I_{n2}}{I_{n1}} = p = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} \qquad \ldots (7.135)$$

Za zaštitu transformatora u spoju zvijezda-trokut (sl. 7.93) možemo provesti isto razmatranje, ali tada nije dovoljno promatrati struje samo u jednoj fazi. Struje tropolnog kratkog spoja na sekundarnoj strani transformatora iznose

$$\mathbf{I}_{R2} = \mathbf{I}_{2d}; \quad \mathbf{I}_{S2} = a^2\mathbf{I}_{2d}; \quad \mathbf{I}_{T2} = a\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.136)$$

pa su u sekundarnim namotima strujnih transformatora

$$\mathbf{i}_{R2}' = \frac{\mathbf{I}_{2d}}{p_2}; \quad \mathbf{i}_{S2}' = a^2\frac{\mathbf{I}_{2d}}{p_2}; \quad \mathbf{i}_{T2}' = a\frac{\mathbf{I}_{2d}}{p_2} \qquad \ldots (7.137)$$



Slika 7.93. Shema spoja diferencijalne zaštite transformatora zvijezda—trokut bez međutransformatora

dok su struje koje izlaze iz trokuta sekundarnih namota strujnih transformatora

$$\mathbf{i}_{R2} = \mathbf{i}_{R2}' - \mathbf{i}_{T2}' = (1 - a)\frac{\mathbf{I}_{2d}}{p_2} \qquad \ldots (7.138a)$$

$$\mathbf{i}_{S2} = \mathbf{i}_{S2}' - \mathbf{i}_{R2}' = (a^2 - 1)\frac{\mathbf{I}_{2d}}{p_2} \qquad \ldots (7.138b)$$

$$\mathbf{i}_{T2} = \mathbf{i}_{T2}' - \mathbf{i}_{S2}' = (a - a^2)\frac{\mathbf{I}_{2d}}{p_2} \qquad \ldots (7.138c)$$

U namotima primarne strane učinskog transformatora teku struje

$$\mathbf{I}_{R1}' = \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{\mathbf{I}_{R2}}{p} = \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{\mathbf{I}_{2d}}{p} \qquad \ldots (7.139a)$$

$$\mathbf{I}_{S1}' = \frac{1}{\sqrt{3}}a^2\frac{\mathbf{I}_{2d}}{p} \qquad \ldots (7.139b)$$

$$\mathbf{I}_{T1}' = \frac{1}{\sqrt{3}}a\frac{\mathbf{I}_{2d}}{p} \qquad \ldots (7.139c)$$

a u vodovima na primarnoj strani

$$\mathbf{I}_{R1} = \mathbf{I}_{R1}' - \mathbf{I}_{T1}' = \frac{1}{\sqrt{3}}(1 - a)\frac{\mathbf{I}_{2d}}{p} \qquad \ldots (7.140a)$$

$$\mathbf{I}_{S1} = \mathbf{I}_{S1}' - \mathbf{I}_{R1}' = \frac{1}{\sqrt{3}}(a^2 - 1)\frac{\mathbf{I}_{2d}}{p} \qquad \ldots (7.140b)$$

$$\mathbf{I}_{T1} = \mathbf{I}_{T1}' - \mathbf{I}_{S1}' = \frac{1}{\sqrt{3}}(a - a^2)\frac{\mathbf{I}_{2d}}{p} \qquad \ldots (7.140c)$$

Na sekundarnoj strani strujnih transformatora postavljenih na primarne strane učinskog transformatora teku struje

$$\mathbf{i}_{R1} = \frac{\mathbf{I}_{R1}}{p_1} = \frac{1}{\sqrt{3}}(1-a)\frac{\mathbf{I}_{2d}}{pp_1} \qquad \ldots (7.141a)$$

$$\mathbf{i}_{S1} = \frac{\mathbf{I}_{S1}}{p_1} = \frac{1}{\sqrt{3}}(a^2-1)\frac{\mathbf{I}_{2d}}{pp_1} \qquad \ldots (7,141b)$$

$$\mathbf{i}_{T1} = \frac{\mathbf{I}_{T1}}{p_1} = \frac{1}{\sqrt{3}}(a-a^2)\frac{\mathbf{I}_{2d}}{pp_1} \qquad \ldots (7.141c)$$

Iz uvjeta da je $\mathbf{i}_{R1} = \mathbf{i}_{R2}$, $\mathbf{i}_{S1} = \mathbf{i}_{S2}$ i $\mathbf{i}_{T1} = \mathbf{i}_{T2}$ dobiva se

$$\frac{p_2}{p_1} = \sqrt{3}\,p \qquad \ldots (7.142)$$

a ako postavimo da je $i_{n1} = i_{n2}$ imamo

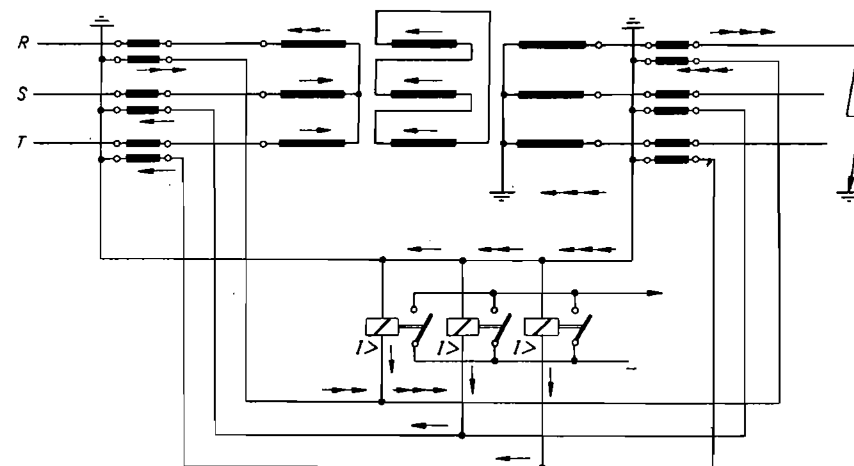
$$\frac{I_{n2}}{I_{n1}} = \sqrt{3}\,p = \sqrt{3}\,\frac{U_{n1}}{U_{n2}} \qquad \ldots (7.143)$$

Prema tome, za strujne transformatore na strani zvijezde treba odabrati za $\sqrt{3}$ veću nazivnu struju od one koja bi odgovarala nazivnoj struji učinskog transformatora.

Mana priključka diferencijalne zaštite prema shemama na sl. 7.92. i 7.93. jest ta što se za samo jedan slog strujnih transformatora (bilo na kojoj strani učinskog transformatora) mogu upotrijebiti strujni transformatori normalizirane primarne struje, jer za drugi slog mora biti zadovoljena relacija (7.135), odnosno (7.143), pa su potrebni strujni transformatori nenormalizirane primarne nazivne struje. Osim toga, kad se radi o transformatoru zvijezda—trokut (sl. 7.93) ne postoji mogućnost uzemljenja jedne od sekundarnih stezaljki strujnih transformatora postavljenih na strani zvijezde, što nije poželjno zbog razloga sigurnosti. Treba, međutim, naglasiti da će zaštita priključena prema sl. 7.92. i 7.93. ispravno djelovati.

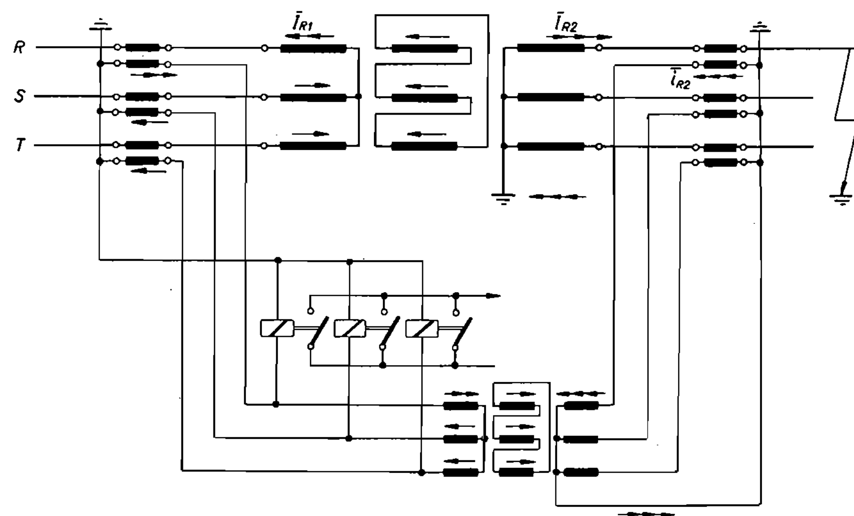
Nasuprot tome, to se ne može tvrditi za spoj analogan onome na sl. 7.92, ako transformator zvijezda-zvijezda ima još i tercijarni namot spojen u trokut (sl. 7.94). Zaštita će, naime, djelovati i u slučaju kratkog spoja izvan štićenog područja, ako se pojavljuje nulta komponenta struje. Pogrešno djelovanje zaštite u slučaju jednopolnog kratkog spoja izvan štićenog područja prikazano je na sl. 7.94, jer u prikazanom slučaju kroz diferencijalne releje protječe struja, što će dovesti do njihovog djelovanja i pored toga što je kvar izvan štićenog područja.

Zbog svih tih razloga normalno se diferencijalna zaštita izvodi s međutransformatorom koji ima isti spoj kao učinski transformator, a spojen je na sekundarne namote strujnih transformatora spojenih u zvijezdu. Postavljanjem međutransformatora moguće je upotrijebiti strujne transformatore normaliziranog prijenosnog omjera, jer se korektura prijenosnog omjera vrši međutransformatorom. Zbog toga je u svakom slučaju potrebno odrediti prijenosni omjer međutransformatora. Pođimo od sheme



Slika 7.94. Shema spoja diferencijalne zaštite transformatora zvijezda—zvijezda s tercijarnim namotom spojenim u trokut bez međutransformatora (prikaz pogrešnog djelovanja za slučaj jednopolnog kratkog spoja izvan štićenog područja)

na sl. 7.95. i pretpostavimo da je na sekundarnoj strani nastao jednopolni kratki spoj. Koristeći oznake upotrebljene za razmatranje sheme na sl. 7.92. za struje u sekundarnim namotima strujnih transformatora, dobi-



Slika 7.95. Shema spoja diferencijalne zaštite transformatora zvijezda—zvijezda s tercijarnim namotom spojenim u trokut s međutransformatorom — prilike za slučaj jednopolnog kratkog spoja izvan štićenog područja

vamo veličine prema (7.129) i (7.133). Budući da postoji međutransformator s prijenosnim omjerom p_3 definiran omjerom

$$p_3 = \frac{i_{n1}'}{i_{n2}'} \qquad \ldots (7.144)$$

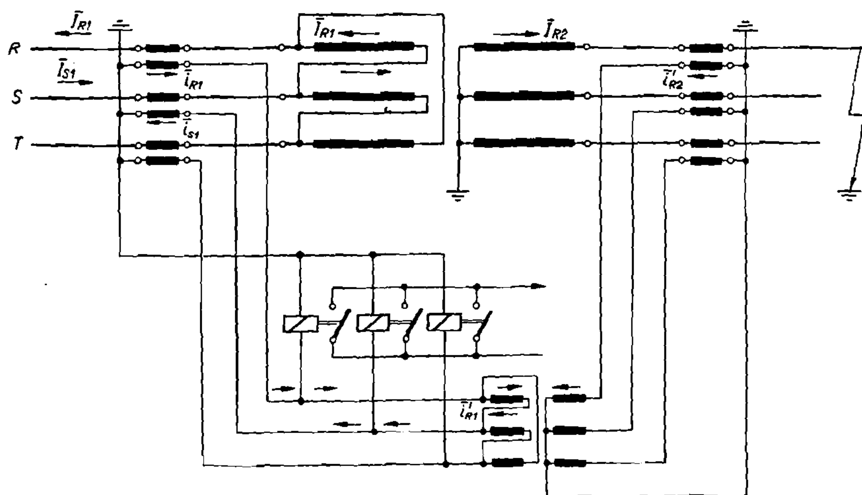
gdje su i_{n1}' nazivna struja namota priključenog na primarnu, a i_{n2}' nazivna struja namota priključenog na sekundarnu stranu učinskog transformatora, struja $\mathbf{i}_{R1}$ transformirana u međutransformatoru iznosi

$$\mathbf{i}_{R1}' = \frac{\mathbf{i}_{R1}}{p_3} = \frac{\mathbf{I}_{R2}}{p\,p_1\,p_3} \qquad \ldots (7.145)$$

Da ne bi došlo do djelovanja diferencijalnog releja mora da bude $\mathbf{i}_{R1}' = \mathbf{i}_{R2}$, pa je prijenosni omjer međutransformatora

$$p_3 = \frac{1}{p}\,\frac{p_2}{p_1} \qquad \ldots (7.146)$$

Prijenosni omjer p_3 stvarno je korektura koja je potrebna kad nije ispunjena relacija (7.135). Ako je, naime, zadovoljena spomenuta relacija bit će $p_3 = 1$, pa radi korekture prijenosnih omjera međutransformator ne bi ni bio potreban. No kad se uzmu u obzir prilike u slučaju kratkih spojeva pri kojima se pojavljuje nulta komponenta struje — usporedi sl. 7.94. i 7.95. — pokazuje se neophodnost međutransformatora za transformator zvijezda-zvijezda s tercijarnim namotom spojenim u trokut. Tada se naime nulte komponente struje zatvaraju u namotu međutransformatora spojenog u trokut (sl. 7.95), mjesto kroz diferencijalne releje (sl. 7.94).



Slika 7.96. Shema spoja diferencijalne zaštite transformatora zvijezda—trokut s međutransformatorom — prilike za slučaj jednopolnog kratkog spoja izvan štićenog područja

I diferencijalna zaštita transformatora zvijezda-trokut može se izvesti s međutransformatorom (sl. 7.96) koji ima isti spoj kao i učinski transformator. Prijenosni omjer međutransformatora može se odrediti slijedećim razmatranjem. Za struje na sekundarnoj strani učinskog transformatora vrijedi (7.136), a za struje u sekundarnim namotima strujnih transformatora vrijede relacije (7.137), dok se struje u sekundarnim namotima strujnih transformatora na primarnoj strani učinskog transformatora određuju iz relacija (7.141). Transformiranjem struja $\mathbf{i}_{R2}'$, $\mathbf{i}_{S2}'$ i $\mathbf{i}_{T2}'$ u namotu međutransformatora spojenog u trokut dobivamo

$$\mathbf{i}_{R1}' = p_3\,\mathbf{i}_{R2}' \qquad \ldots (7.147a)$$

$$\mathbf{i}_{S1}' = p_3\,\mathbf{i}_{S2}' \qquad \ldots (7.147b)$$

$$\mathbf{i}_{T1}' = p_3\,\mathbf{i}_{T2}' \qquad \ldots (7.147c)$$

gdje je p_3 prijenosni omjer definiran izrazom (7.144). Treba naglasiti da se prijenosni omjer odnosi na pojedinačne strujne transformatore u sklopu međutransformatora. Struje u vodovima priključenim na namot spojen u trokut iznose

$$\mathbf{i}_{R1}'' = \mathbf{i}_{R1}' - \mathbf{i}_{T1}' = (1 - a)\,\frac{p_3}{p_2}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.148a)$$

$$\mathbf{i}_{S1}'' = \mathbf{i}_{S1}' - \mathbf{I}_{R1}' = (a^2 - 1)\,\frac{p_3}{p_2}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.148b)$$

$$\mathbf{i}_{T}'' = \mathbf{i}_{T1}' - \mathbf{i}_{S1}' = (a - a^2)\,\frac{p_3}{p_2}\,\mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.148c)$$

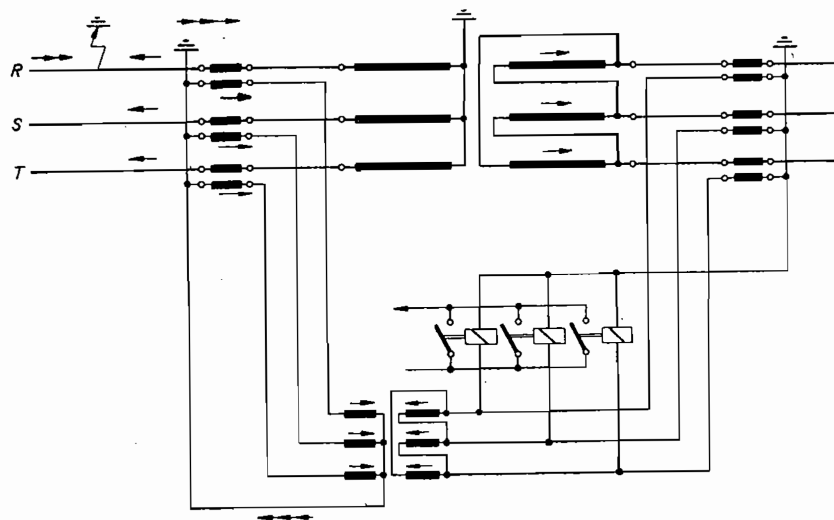
kad uzmemo u obzir relacije (7.137) i (7.147). Ako želimo da kroz diferencijalne releje ne protječu struje, mora biti $\mathbf{i}_{R1}'' = \mathbf{i}_{R1}$, $\mathbf{i}_{S1}'' = \mathbf{i}_{S1}$ i $\mathbf{i}_{T1}'' = \mathbf{i}_{T1}$, pa je prema (7.148) i (7.141)

$$p_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}\,\frac{1}{p}\,\frac{p_2}{p_1} \qquad \ldots (7.149)$$

Kad bismo postavili $p_3 = 1$, došlo bi se do odnosa (7.142), koji vrijedi za shemu spoja bez međutransformatora.

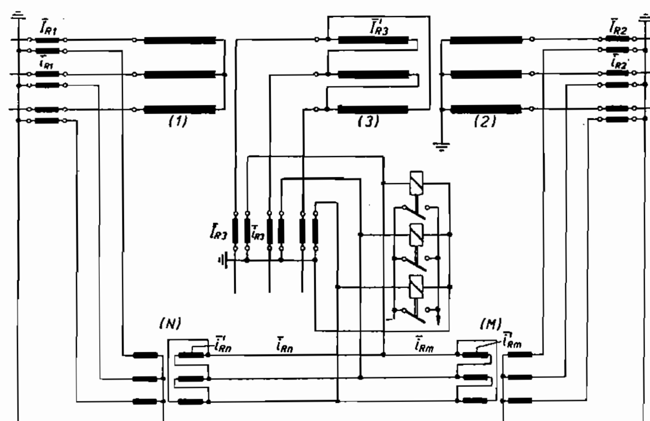
Na sl. 7.95. i 7.96. prikazane su struje pri jednopolnom kratkom spoju za transformator zvijezda—zvijezda s tercijarnim namotom, te za transformator zvijezda—trokut. Na analogan način može se utvrditi ispravnost djelovanja zaštite za dvopolni kratki spoj izvan štićenog područja, te za kratke spojeve unutar štićenog područja.

U svim dosada razmatranim slučajevima pretpostavljeno je da se kratki spoj pojavljuje na suprotnoj strani napajanja. Struje kratkog spoja mogu se međutim pojaviti u transformatoru kad nastane kratak spoj na strani napajanja, ako se radi o kratkom spoju pri kojem se pojavljuje nulta komponenta struje. Takav slučaj može nastupiti ako transformator na primarnoj strani ima uzemljenu zvijezdu (sl. 7.97).



Slika 7.97. Shema spoja diferencijalne zaštite transformatora zvijezda—trokut s međutransformatorom — prilike za slučaj jednopolnog kratkog spoja na strani napajanja izvan štićenog područja

Tada se nulta komponenta struje može zatvoriti kroz nul-tačku transformatora, dok struje ostalih dviju komponenata dolaze sa strane napajanja. Polazeći od komponenata struja (sl. 7.86), a uzimajući u obzir mogućnost zatvaranja nulte komponente struje, struje u krugu zaštite možemo prikazati na onaj način kao na sl. 7.90. i 7.91.



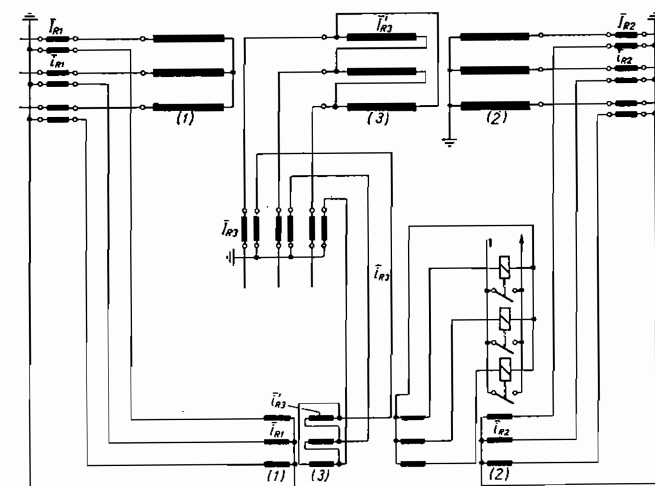
Slika 7.98. Shema spoja diferencijalne zaštite tronamotnog transformatora zvijezda—zvijezda—trokut s dva međutransformatora

d) Diferencijalna zaštita tronamotnih transformatora

Diferencijalna zaštita može se upotrijebiti za tronamotne, pa i višenamotne transformatore. Da bi se osiguralo ispravno djelovanje releja, potrebno je odabrati pogodan spoj međutransformatora, zbog ispravnih veličina diferencijâ strujâ. To se može postići sa više međutransformatora ili s jednim međutransformatorom s više namota.

Ako se upotrijebi više međutransformatora, za zaštitu tronamotnog transformatora potrebna su dva međutransformatora (sl. 7.98), a za zaštitu n-namotnog transformatora potrebno je $n - 1$ međutransformatora. Svi sekundarni namoti glavnih strujnih transformatora spojeni su u zvijezdu — kao i za zaštitu dvonamotnog transformatora —, dok je spoj međutransformatora jednak spoju namota transformatora snage među kojima je priključen međutransformator. Tako npr. međutransformator (*N*) na sl. 7.98. ima namot spojen u zvijezdu na onoj strani koja je priključena na strujne transformatore namota (*1*), koji je također spojen u zvijezdu, dok je drugi namot istog međutransformatora (*N*) spojen u trokut, jer je taj namot priključen na strujne transformatore namota (3) spojenog u trokut.

Ako se upotrijebi jedan međutransformator, sekundarni namoti glavnih strujnih transformatora također su spojeni u zvijezdu, dok namoti međutransformatora imaju isti spoj kao i namoti transformatora snage na koji su priključeni (sl. 7.99). Za zaštitu tronamotnog transformatora potrebna su četiri namota na međutransformatoru (na jedan namot priključeni su diferencijalni releji), dok je za zaštitu n-namotnog transformatora potrebno n + 1 namotâ.



Slika 7.99. Shema spoja diferencijalne zaštite tronamotnog transformatora zvijezda—zvijezda—trokut s jednim međutransformatorom

Odredimo potrebne prijenosne omjere strujnih transformatora za shemu na sl. 7.98. Pretpostavimo da je na strani namota (2), ali izvan

štićenog područja, došlo do tropolnog kratkog spoja, te da u mrežama priključenim na namote (1) i (3) postoje generatori ili sinhroni kompenzatori koji sudjeluju u struji kratkog spoja. Struje u namotima (1) i (3) transformatora možemo odrediti iz relacije

$$\mathbf{I}_{R1} = \frac{A}{p_{12}} \mathbf{I}_{R2} = \frac{A}{p_{12}} \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.150a)$$

$$\mathbf{I}_{R3}' = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{B}{p_{32}} \mathbf{I}_{R2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{B}{p_{32}} \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.150b)$$

gdje su p_{12} i p_{32} prijenosni omjeri odgovarajućih namota transformatora definirani relacijama analognim relaciji (7.132), dok su A i B veličine koje prikazuju udjele mreža u ukupnoj struji kratkog spoja, a ovise o veličini mreža priključenih na namote (1) i (3). Mora biti ispunjena relacija $A + B = 1$, što je lako uvidjeti ako se pretpostavi da su sva tri namota spojena u zvijezdu, a prijenosi su im omjeri $p_{12} = p_{32} = 1$.

Kad se uzmu u obzir komponente direktnog sistema, struje u vodovima priključenim na namot (3) spojen u trokut iznose

$$\mathbf{I}_{R3} = \mathbf{I}_{R3}' - \mathbf{I}_{T3}' = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{B}{p_{32}} (1 - a) \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.151)$$

Struje u sekundarnim namotima strujnih transformatora na strani namota (2) iznose

$$\mathbf{i}_{R2} = \frac{1}{p_2} \mathbf{I}_{R2} = \frac{1}{p_2} \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.152a)$$

$$\mathbf{i}_{T2} = \frac{1}{p_2} a \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.152b)$$

Navedene su struje jedino u fazama R i T, jer su — kako ćemo vidjeti — samo podaci o dvije faze dovoljni da se odrede prijenosni omjeri. U sekundarnim namotima strujnih transformatora na strani (1) transformatora teku struje

$$\mathbf{i}_{R1} = \frac{1}{p_1} \mathbf{I}_{R1} = \frac{A}{p_1 p_{12}} \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.153a)$$

$$\mathbf{i}_{T1} = \frac{A}{p_1 p_{12}} a \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.153b)$$

dok su struje u sekundarnim namotima strujnih transformatora na strani (3)

$$\mathbf{i}_{R3} = \frac{1}{p_3} \mathbf{I}_{R3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{B}{p_3 p_{32}} (1 - a) \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.154)$$

U relacijama (152), (153) i (154) znače p_1, p_2 i p_3 prijenosne omjere strujnih transformatora.

Struje u namotu međutransformatora M spojenog u trokut iznose

$$\mathbf{i}_{Rm}' = p_m \mathbf{i}_{R2} = \frac{p_m}{p_2} \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.155a)$$

$$\mathbf{i}_{Tm}' = p_m \mathbf{i}_{T2} = \frac{p_m}{p_2} a \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.155b)$$

dok je struja u vodu na strani trokuta istog međutransformatora

$$\mathbf{i}_{Rm} = \mathbf{i}_{Rm}' - \mathbf{i}_{Tm}' = \frac{p_m}{p_2} (1 - a) \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.156)$$

gdje je p_m prijenosni omjer međutransformatora M.

Ako sa p_n označimo prijenosni omjer međutransformatora N, struje u njegovim namotima spojenim u trokut bit će

$$\mathbf{i}_{Rn}' = p_n \mathbf{i}_{R1} = \frac{p_n}{p_1 p_{12}} A \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.157a)$$

$$\mathbf{i}_{Tn}' = \frac{p_n}{p_1 p_{12}} A a \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.157b)$$

dok je struja u vodu priključenom na namot spojen u trokut

$$\mathbf{i}_{Rn} = \mathbf{i}_{Rn}' - \mathbf{i}_{Tn}' = \frac{p_n}{p_1 p_{12}} A (1 - a) \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.158)$$

Ako se želi da diferencijalni relej ne djeluje, a ne treba da djeluje, potrebno je da bude

$$\mathbf{i}_{Rm} = \mathbf{i}_{Rn} + \mathbf{i}_{R3} \qquad \ldots (7.159)$$

odnosno, nakon uvrštavanja vrijednosti iz (7.154), (7.156) i (7.158), te nakon skraćivanja

$$\frac{p_m}{p_2} = \frac{p_n}{p_1 p_{12}} A + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{B}{p_3 p_{32}} \qquad \ldots (7.160)$$

Budući da je $A + B = 1$, te da relacija (7.160) vrijedi za bilo kakav odnos među veličinama A i B, mora relacija (7.160) biti ispunjena i za A = 0, i za B = 0. Za prvi slučaj (A = 0) postaje B = 1, pa je

$$p_m = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{p_2}{p_{32} p_3} \qquad \ldots (7.161)$$

što odgovara relaciji (7.149), ako uzmemo u obzir različite oznake za prijenosne omjere. Kad je $A = 0$, tronamotni transformator postaje dvonamotni u spoju zvijezda-trokut, jer kroz namot (1) ne teče struja. U drugom slučaju ($B = 0$) postaje $A = 1$, pa je — iz (7.160) — uzimajući u obzir vrijednost za p_m

$$p_n = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{p_1 p_{12}}{p_3 p_{32}} \qquad \ldots (7.162a)$$

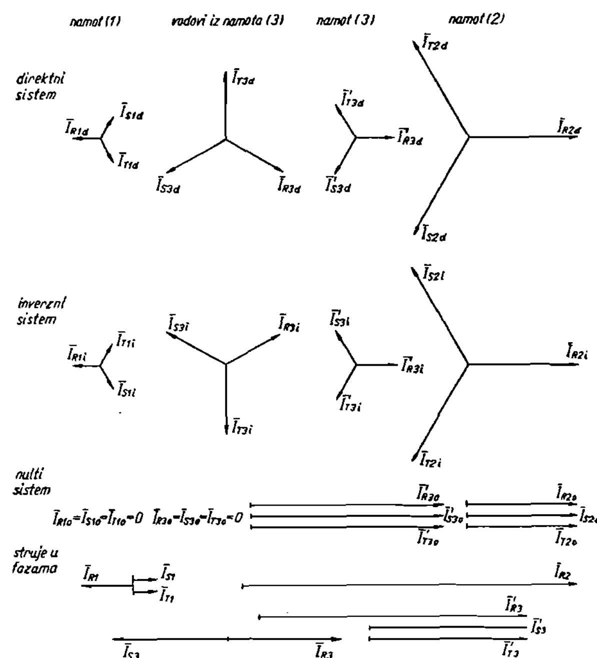
odnosno

$$p_n = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{p_1 p_{13}}{p_3} \qquad \ldots (7.162b)$$

ako se uzme u obzir da je $p_{12} = p_{13} p_{32}$

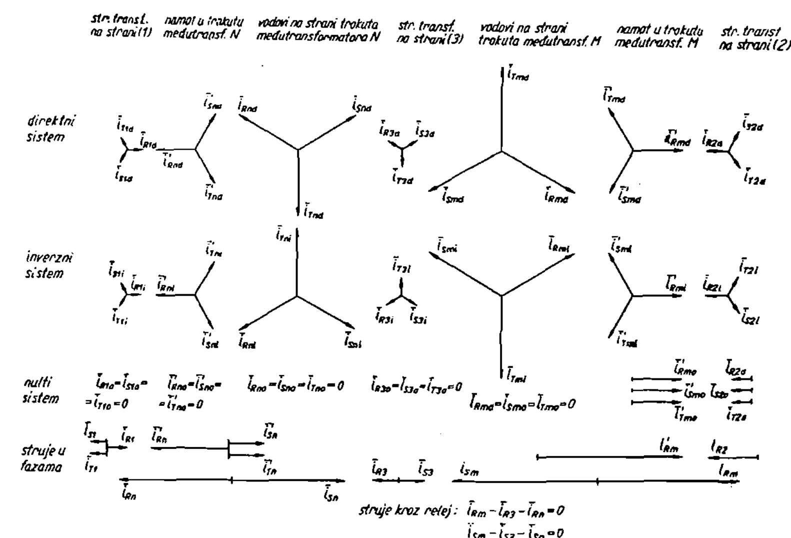
Do istog rezultata bismo došli kad bismo razmatrali bilo koju od triju faza ili kad bismo razmatrali bilo koji slučaj kratkog spoja.

Kao primjer određivanja struja u krugu zaštite promatran je jednopolni kratki spoj faze R na strani namota (2) izvan štićenog područja transformatora zvijezda-zvijezda-trokut (sl. 7.98). Transformator ima prijenosne omjere $p_{12} = 110/30$, $p_{13} = 110/10$ i $p_{32} = 10/30$, dok su prijenosni omjeri strujnih transformatora $p_1 = 200/5$, $p_2 = 600/5$ i $p_3 = 400/5$.



Slika 7.100. Komponente struja i struje u fazama tronamotnog transformatora zvijezda—zvijezda—trokut (sl. 7.98) za slučaj jednopolnog kratkog spoja faze R na strani namota (2) izvan štićenog područja uz predpostavku da je $A = 0{,}8$ (7.150a) i $B = 0{,}2$ (7.150b)

Iz (7.161) i (7.162) dobivamo za prijenosne omjere međutransformatora $p_m = 2{,}59$ i $p_n = 3{,}17$. Na sl. 7.100. prikazane su komponente struja u namotima transformatora, te na stezaljkama namota spojenog u trokut. Komponente struja crtane su uz pretpostavku da mreže 110 i 10 kV sudjeluju u struji kratkog spoja ($A = 0{,}8$, $B = 0{,}2$) i to samo u direktnoj i inverznoj komponenti, jer — prema shemi spoja transformatora — iz tih mreža ne može doći nulta komponenta struje, koja se zatvara u namotu spojenom u trokut. Na sl. 7.101. prikazane su struje u sekundarnim namotima svih triju slogova strujnih transformatora uzimajući u obzir veličine struja u primarnim namotima i prijenosne omjere strujnih transformatora. Osim toga su nacrtane struje unutar trokuta



Slika 7.101. Komponente struja i struje u fazama diferencijalne zaštite tronamotnog transformatora (sl. 7.98) za slučaj jednopolnog kratkog spoja faze R na strani namota (2) izvan štićenog područja, te za prijenosne omjere $p_1 = 200/5$ A, $p_2 = 600/5$ A, $p_3 = 400/5$ A, $p_m = 2{,}59$ i $p_n = 3{,}17$

međutransformatora, te struje na izlazu iz međutransformatora. Pri tome je uzet u obzir izračunati prijenosni omjer međutransformatora. Kako se radi o kratkom spoju izvan štićenog područja, vidimo kroz relej ne teku struje.

Da se odrede prijenosni omjeri međutransformatora sa sl. 7.99, može se poći od struja $\mathbf{i}_{R1}$ (7.153a) i $\mathbf{i}_{R2}$ (7.152a). Pri određivanju struje $\mathbf{i}_{R3}'$ u namotu spojenom u trokut potrebno je pored struje $\mathbf{i}_{R3}$ (7.154) poznavati i struju

$$\mathbf{i}_{S3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{B}{p_3\, p_{32}} (a^2 - 1)\, \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.163)$$

Struja u namotu spojenom u trokut iznosi

$$\mathbf{i}_{R3}' = \frac{1}{3} (\mathbf{i}_{R3} - \mathbf{i}_{S3}) = \frac{1}{3\sqrt{3}} \frac{B}{p_3\, p_{32}} (2 - a - a^2)\, \mathbf{I}_{2d} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{B}{p_3\, p_{32}} \mathbf{I}_{2d} \qquad \ldots (7.164)$$

jer je $a^2 + a + 1 = 0$. Budući da kroz namot na koji su priključeni releji u promatranom slučaju (kratki spoj izvan štićenog područja) ne smije teći struja, zbroj amperzavoja triju ostalih namota mora biti jednak nuli. Uzimajući u obzir smjerove struja, mora biti

$$\mathbf{i}_{R2}\, z_2 = \mathbf{i}_{R1}\, z_1 + \mathbf{i}_{R3}'\, z_3 \qquad \ldots (7.165)$$

gdje je sa z označen broj zavoja pojedinih namota. Uvrštavanjem vrijednosti za struje, a nakon skraćivanja, dobivamo

$$z_2 \frac{1}{p_2} = z_1 \frac{A}{p_1 p_{13}} + z_3 \frac{B}{\sqrt{3}\, p_3 p_{32}} \qquad \ldots (7.166)$$

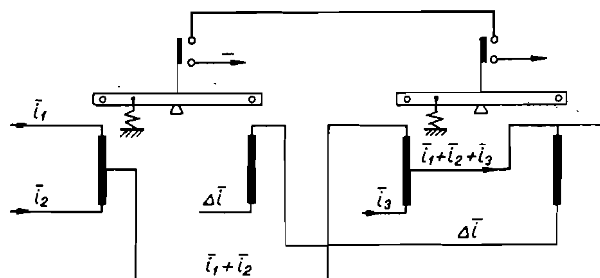
Kad uzmemo u obzir relaciju $A + B = 1$, o čemu je bilo govora pri određivanju prijenosnih omjera međutransformatora prema shemi na sl. 7.98, te postavimo jednom da je $A = 0$, a drugi puta da je $B = 0$, dobivamo omjere brojeva zavoja

$$\frac{z_2}{z_3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{p_2}{p_3 p_{32}} \qquad \ldots (7.167a)$$

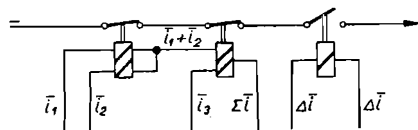
$$\frac{z_2}{z_1} = \frac{p_1}{p_1 p_{12}} \qquad \ldots (7.167b)$$

Iz omjera broja zavoja (7.167) lako je doći do omjera z_1/z_3.

U shemama sa sl. 7.98. i 7.99. nisu radi pojednostavnjenja prikazivanja ucrtani spojevi za stabilizaciju. Za izvedbu u vagi potrebna su dva releja (sl. 7.102). Do djelovanja diferencijalne zaštite doći će tek kad prorade



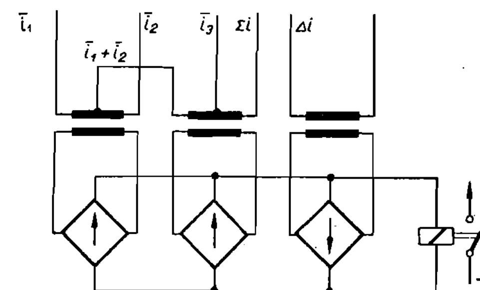
Slika 7.102. Shema spoja diferencijalnih stabiliziranih releja na principu vage za tronamotni transformator (prikaz za struje jedne faze)



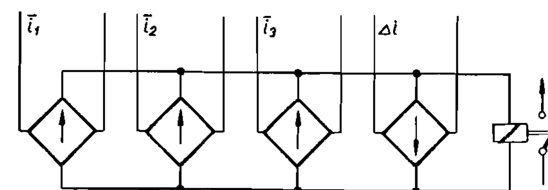
Slika 7.103. Shema spoja stabilizirane diferencijalne zaštite pomoću releja s usporedbom magnetskih tokova za tronamotni transformator (prikaz za struje jedne faze)

oba releja. Na taj se način osigurava stabilizacija diferencijalne zaštite, bez obzira na smjer napajanja. Pri upotrebi releja koji se osniva na usporedbi magnetskih tokova (sl. 7.82) također su nužna dva takva releja s mirnim kontaktima spojenim u seriju (sl. 7.103). S njima u

seriju spojen je radni kontakt nadstrujnog releja, na koji djeluje diferencija struja. Na sl. 7.104. i 7.105. prikazane su sheme spoja stabilizirane diferencijalne zaštite s mostom istosmjerne struje. U prvom slučaju (sl.



Slika 7.104. Shema spoja stabilizirane diferencijalne zaštite s mostom istosmjerne struje nakon geometrijskog zbrajanja struja za tronamotni transformator (prikaz za struje jedne faze)



Slika 7.105. Shema spoja stabilizirane diferencijalne zaštite s mostom istosmjerne struje uz aritmetsko zbrajanje struja za tronamotni transformator (prikaz za struje jedne faze)

7.104) ispravljanje se vrši tek nakon zbrajanja u strujnim transformatorima, dok se u drugom slučaju (sl. 7.105) zbrajanje struja vrši tek nakon ispravljanja.

e) Utjecaj struje magnetiziranja i struje uklapanja

Struja magnetiziranja transformatora djeluje kao struja pogreške na diferencijalnu zaštitu transformatora, jer se struja magnetiziranja pojavljuje samo u primarnom namotu. Normalno međutim ta struja ne iznosi više od 10% nazivne struje transformatora, pa praktički ne utječe na djelovanje diferencijalne zaštite, jer je ona tako udešena da djeluje tek kad struja Δi postigne vrijednost od oko 30% nazivne struje. Tako visoko udešenje potrebno je da se spriječi pogrešno djelovanje diferencijalne zaštite u slučaju povišenja napona, do čega može doći kad je transformator priključen na dugi vod ili ako je povišenje napona potrebno iz pogonskih razloga. Povišenjem napona povećava se naime struja magnetiziranja, koja raste brže od porasta napona.

Da bi diferencijalna zaštita ispravno djelovala mnogo je važnija njezina neosjetljivost prema struji uklapanja transformatora. Uklopimo li, naime, transformator pojavit će se struja uklapanja (Lit. 15. i 92). Ta struja protječe samo kroz primarni namot transformatora pa će — ako uklapanje uslijedi u nepogodnom trenutku — dovesti do djelovanja diferencijalne zaštite. Struja uklapanja, slično kao i ona kratkog spoja, sastoji se od istosmjerne i izmjenične komponente, a osim toga u izmjeničnoj komponenti pojavljuju se viši harmonički članovi.

Djelovanje diferencijalne zaštite radi struje uklapanja može se spriječiti postavljanjem vremenskog releja u krug diferencijalne zaštite. Vrijeme zatezanja vremenskog releja treba da bude toliko da ne dođe do uklapanja strujnog kruga za okidanje sve dok struja uklapanja ne padne na vrijednost pri kojoj više neće djelovati diferencijalni relej. Potrebno vrijeme zatezanja ovisi o konstrukciji transformatora, a iznosi od 0,3 do 2 sekunde. Postavljanjem vremenskog releja diferencijalna zaštita djelovat će s vremenskim zatezanjem i u slučaju kvara u transformatoru, a to je nepoželjno, jer diferencijalni relej treba da djeluje što je moguće brže. Da se postigne vremensko zatezanje u trenutku uklapanja, a trenutačno djelovanje u slučaju kvara, može se djelovanje vremenskog releja povezati sa sklopkom transformatora. U slučaju uklapanja sklopke diferencijalni relej djeluje preko vremenskog releja, dok je sve ostalo vrijeme vremenski relej premošten. Takav uređaj djeluje samo onda ako se transformator uklapa vlastitom sklopkom, ali nema od njega nikakve koristi ako se transformator stavlja pod napon nekom drugom sklopkom.

Utjecaj struje uklapanja može se smanjiti ako se diferencija struja transformira preko pomoćnog strujnog transformatora, koji postaje zasićen istosmjernom komponentom struje uklapanja, pa zato niti ne transformira (ili tek u malom iznosu) izmjeničnu komponentu struje. To dovodi do znatne strujne pogreške pri velikim strujama kvara.

Da se smanji utjecaj struje uklapanja koristi se razlika broja promjena privlačne sile u sekundi pri pojavi samo izmjenične i pri pojavi pored izmjenične i istosmjerne komponente struje. Ako kroz elektromagnetski relej protječe izmjenična struja frekvencije 50 perioda, privlačna se sila mijenja 100 puta u sekundi. Ako je međutim istosmjerna komponenta tolika da su sve vrijednosti struje iznad apscise, sila će se mijenjati 50 puta u sekundi. Ako se pero, koje se suprotstavlja sili, izvede tako da se nalazi u rezonanciji pri 50 perioda (50 promjena sile u sekundi), neće doći do zatvaranja kontakta releja i pored toga što će kroz relej teći dovoljno velika struja. Relej će djelovati nakon opadanja istosmjerne komponente struje, kad vrijednosti struje padnu ispod osi apscisa. Budući da je vremenska konstanta promjene istosmjerne komponente struje uklapanja znatno veća od vremenske konstante istosmjerne komponente struje kratkog spoja, neće opisana izvedba utjecati na djelovanje releja u slučaju kratkog spoja.

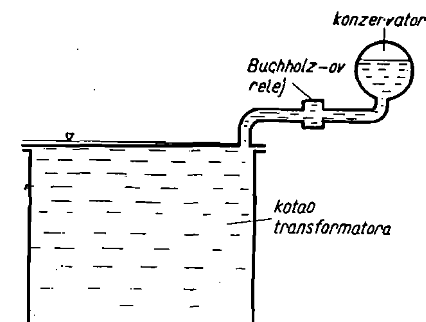
Osim toga, može se postojanje viših harmoničkih članova u struji uklapanja iskoristiti za sprečavanje djelovanja diferencijalne zaštite pri uklapanju transformatora. Diferencija struja koja treba da djeluje na relej dovodi se diferencijalnom releju nakon ispravljanja preko prigušnice i kapaciteta koji su u rezonanciji za frekvenciju 50 Hz. Paralelno

s prigušnicom i kapacitetom priključen je pomoćni strujni transformator, čija se sekundarna struja, ispravljena sa suprotnim polaritetom, dovodi istom diferencijalnom releju, pa će kroz njega protjecati razlika tih dviju struja, što će onemogućiti djelovanje releja kad se radi o struji uklapanja transformatora. Nasuprot tome, relej će djelovati kad se radi o struji kratkog spoja u kojoj su viši harmonički članovi znatno manji.

7.8. OSTALE ZAŠTITE TRANSFORMATORA

A. Buchholzov relej

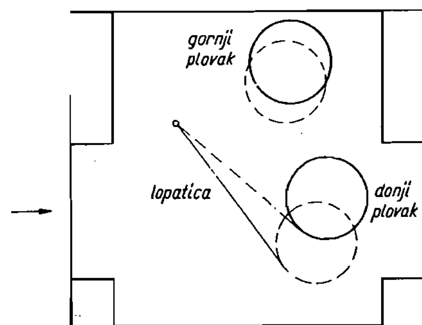
Svaki preskok u transformatoru, kao i svako ugrijavanje bilo radi proboja izolacije vodiča i protjecanja struje kvara, bilo radi oštećenja izolacije među limovima, izazvat će isparavanje, odnosno izgaranje ulja u kotlu transformatora. Plinovi se podižu prema poklopcu transformatora i struje kroz cijev koja spaja kotao s konzervatorom (sl. 7.106).



Slika 7.106. Smještaj Buchholzovog releja

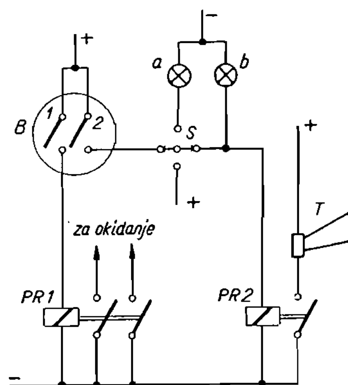
Kako bi plin iz kotla stigao do spojne cijevi što prije i što neposrednije, treba kotao transformatora postaviti u nagnut položaj (nagib poklopca 1—2%) da najviše mjesto na poklopcu bude baš na mjestu gdje izlazi cijev iz kotla. Buchholzov relej postavljen u spojnu cijev između kotla i konzervatora omogućuje kontrolu razvijanja plinova u kotlu, a na taj način i zaštitu od proširenja već nastalog kvara. Buchholzov relej ima dva plovka i pločicu (sl. 7.107), čiji položaj ovisi o količini plina sakupljenog u kućištu releja i o strujanju plinova i ulja kroz relej. U slučaju većeg luka u transformatoru ili većeg oštećenja uz naglo razvijanje topline, nastat će intenzivno strujanje plinova i ulja, čije će strujanje djelovati na lopaticu, pa će se njezinim pomakom zatvoriti kontakti živine sklopke koja se nalazi u releju. Ako dođe do manjeg oštećenja razvit će se i male količine plina koji će se sakupljati u gornjem dijelu kućišta releja, što će izazvati sniženje nivoa ulja u releju, pa će se i gornji plovak spuštati, što dovodi do zatvaranja kontakata druge živine sklopke. Ako

ulje počne nestajati iz kotla jer je npr. kotao počeo propuštati, nivo ulja opada, pa se najprije spušta prvi plovak, a nakon toga i drugi, koji također zatvara kontakte iste živine sklopke na koju djeluje i lopatica. Kontakti donjeg plovka i lopatice zatvaraju strujni krug za isklapanje transformatora, dok strujni krug koji se zatvara kontaktima gornjeg plovka djeluje na signalizaciju.



Slika 7.107. Skica jedne od izvedaba Buchholzovog releja

Primjer sheme spoja Buchholzova releja prikazan je na sl. 7.108. Kontakt (1) Buchholzova releja (B), na koji djeluje lopatica i donji plovak, uzbuđuje svitak pomoćnog releja PR1, koji zatvara strujni krug za okidanje sklopaka s obje strane transformatora. Zatvaranjem kontakta (2) gornjeg plovka uzbuđuje se svitak drugog pomoćnog releja (PR2), čiji radni kontakt uključuje trubu (T). Zatvaranjem kontakta (2) pali se sig-



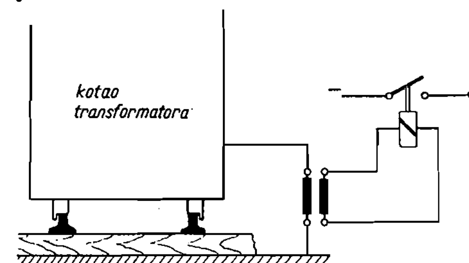
Slika 7.108. Shema spoja Buchholzovog releja s pomoćnim strujnim krugovima za okidanje sklopaka i signalizaciju

nalna žarulja (b). Kad se kvar opazi može se isključiti truba okretanjem preklopke (S), čime se pali druga žarulja (a), koja pokazuje da je kontakt (2) još zatvoren. Opisana shema prikladna je za manje transformatorske stanice, dok se u većim stanicama signalizacija Buchholzova releja kombinira s ostalom signalizacijom.

Gornji plovak može se spustiti i onda kad ne postoji kvar u transformatoru, ako je transformator stavljen u pogon neposredno nakon filtriranja ili dolijevanja ulja, jer s uljem tada dolazi u transformator i zrak koji se postepeno sakuplja u releju. Zbog toga je predviđena mogućnost kontrole plina koji se je sakupio u gornjem dijelu releja. Otvaranjem pipca na vrhu releja plin se ispušta i pokušava zapaliti. Ako plin gori, sigurno je da se radi o kvaru u transformatoru, a ako ne gori, potrebno je tražiti razlog prodiranju zraka u kotao.

B. Zaštita transformatora mjerenjem napona kotla prema zemlji

Kotao transformatora relativno je slabo spojen sa zemljom preko kotačâ na njegovu dnu, pa je zbog toga još posebno uzemljen. Dođe li do preskoka između dijelova pod naponom i kotla (ili dijelova koji su galvanski spojeni s kotlom), poteći će struja kroz vod za uzemljenje koji spaja kotao sa zemljom, odnosno kotao će doći pod napon. Ako još bolje izoliramo kotače transformatora od zemlje, bit će moguće ustanoviti i pojavu manjih napona između kotla i zemlje pomoću naponskog transformatora (sl. 7.109), pa će pojava napona moći poslužiti kao kriterij za ustanovljavanje kvara.



Slika 7.109. Shema spoja zaštite transformatora mjerenjem napona kotla prema zemlji

Na sl. 7.109. prikazana je shema spoja opisane zaštite. U sekundarni krug naponskog transformatora uključen je nadnaponski relej, koji je udešen na relativno nizak napon i djeluje na isklapanje sklopaka bez vremenskog zatezanja.

C. Kontrola temperature ulja

Temperatura ulja u transformatoru mjeri se na mjestu gdje je ona najviša, tj. neposredno ispod poklopca transformatora. To mjerenje ne može zamijeniti zaštitu od preopterećenja, jer tek pri vrlo polaganim promjenama opterećenja temperatura ulja slijedi temperaturu namota.

Termometar za kontrolu temperature ulja može biti izveden kao kontaktni, kako bi pogonsko osoblje bilo upozoreno da je temperatura ulja dostigla dopuštenu visinu.

D. Kontrola strujanja ulja i vode

Potrebno je stalno kontrolirati da li u transformatorima s prisilnom cirkulacijom ulja i u onima koji se hlade vodom postoji cirkulacija ulja, odnosno strujanje vode. Da ta kontrola bude moguća ugrađuje se u tlačni vod ili zaklopka koja lebdi kad postoji strujanje, ili kontaktni manometar. Prestankom strujanja spušta se zaklopka, odnosno pada tlak, što dovodi do zatvaranja kontakata i akustičkog i vizuelnog signala, kako bi se upozorilo osoblje da hlađenje transformatora ne funkcionira.

E. Upotreba zaštitâ transformatora

U svakom slučaju potrebno je predvidjeti nadstrujnu zaštitu transformatora, koja ga štiti od vanjskih kratkih spojeva. Hoće li to biti osigurači, primarni ili sekundarni releji, ovisi o veličini transformatora. Za male transformatore (do 300 kVA) najprikladniji su osigurači, a za one do oko 1500 kVA primarni ili sekundarni releji, što opet ovisi o veličini transformatorske stanice, o postojanju akumulatorske baterije i sl., dok za još veće transformatore praktički ne dolazi u pitanje upotreba primarnih releja.

Za veće transformatore (npr. 4000 kVA i više) dolazi u obzir i termički relej.

Za zaštitu od proširenja unutrašnjeg kvara služe diferencijalni i Buchholzovi releji, te zaštita mjerenjem napona kotla prema zemlji. Područje zaštite Buchholzova releja ograničeno je na kotao transformatora, ali tim relejom moguće je obuhvatiti i one kvarove koje ne može registrirati diferencijalni relej zbog malih struja. Pri većim strujama kvara djelovat će obje zaštite, pa jedna služi kao rezerva drugoj. Područje djelovanja diferencijalne zaštite šire je od područja Buchholzove zaštite, jer diferencijalna obuhvaća područje između strujnih transformatora. Normalno se transformatori nazivne snage od oko 400 kVA i više izvode s Buchholzovim relejom, dok se za transformatore nazivne snage iznad 3000 kVA, pored Buchholzova releja, upotrebljava i diferencijalna zaštita.

Uspoređujući Buchholzov relej sa zaštitom pomoću mjerenja napona kotla prema zemlji, vidimo da Buchholzov relej ima veće područje djelovanja. On, naime, djeluje pri svim kvarovima unutar kotla, dok naponski relej, priključen na naponski transformator između kotla i zemlje, reagira samo na kvarove koji dovode do zemnog spoja, a ne reagira na spoj među zavojima i spoj među namotima.

Diferencijalni releji s uređajem za sprečavanje pogrešnog djelovanja pri uklapanju obično se upotrebljavaju za velike transformatore (10 MVA i više).

Naravno da nije moguće navesti recept za upotrebu pojedinih zaštita, jer to ne ovisi samo o veličini transformatora, nego o njegovoj ulozi i važnosti u mreži, te o općem stanju u dotičnom sistemu (raspoloživa rezerva transformatora, mogućnost nabavke i popravke transformatora i sl.).

7.9. ZAŠTITA SABIRNICA

A. Općenito

I pored činjenice da je duljina sabirnica u usporedbi s duljinom vodova vrlo malena, ipak su kvarovi na sabirnicama znatno češći nego što odgovara omjeru duljine sabirnica i vodova. Kvarovi su najčešće posljedica krive manipulacije (sabirnički rastavljači!). Može se računati da od svih kratkih spojeva u mreži 5% otpada na kratke spojeve na sabirnicama.

Kratki spoj na sabirnicama izaziva — ako ne dođe do brzog isklapanja — znatna oštećenja i onemogućuje daljnji pogon cijelog rasklopnog postrojenja i svih vodova koji se napajaju sa sabirnica toga postrojenja. Zaštita sabirnica ima dakle zadatak da ograniči oštećenje, ali ona ne može spriječiti pojavu kvara.

Izvedba sigurne zaštite dvostrukih i višestrukih sabirnica (pogotovo ako još postoji mogućnost uzdužne podjele) komplicirana je, pa se u nekim zemljama (npr. Njemačka) nastoji smanjiti mogućnost nastanka kratkog spoja na sabirnicama (blokiranje rastavljača, sprečavanje proširenja luka na sabirnice i sl.) mjesto relejne zaštite sabirnica.

Ako ne postoji posebna zaštita sabirnica, zaštitu preuzimaju releji vodova, transformatora i generatora. Vremena djelovanja tih zaštita mogu iznositi i nekoliko sekunda, pogotovo pri zaštiti nadstrujnim relejima u velikoj mreži. Sličnu situaciju u mreži imamo kad su vodovi zaštićeni distantnim relejima, iako je vrijeme djelovanja tih releja kraće, jer su generatori i transformatori normalno zaštićeni nadstrujnom zaštitom. Zbog toga se u nekim zemljama (USA, SSSR) u važnim rasklopnim postrojenjima izvodi posebna zaštita sabirnica.

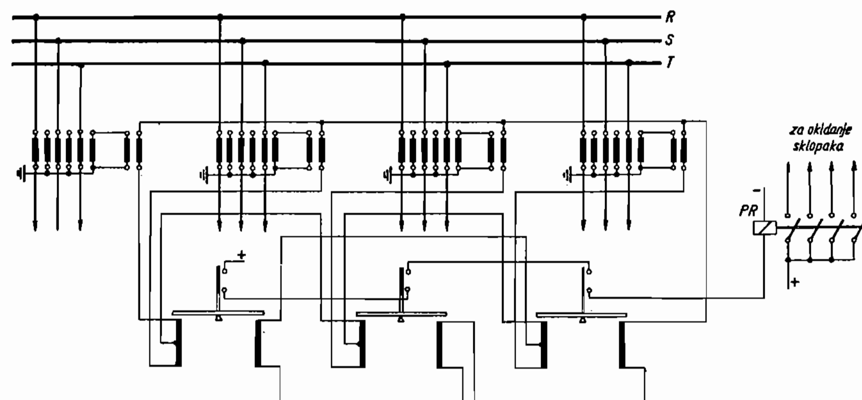
B. Zaštita jednostrukih sabirnica

Sabirnice se mogu zaštititi diferencijalnom zaštitom, jer je i u normalnom pogonu i u slučaju kvara izvan štićenog područja zbroj struja u istim fazama svih odvoda jednak nuli. Taj uvjet nije ispunjen kad postoji kratki spoj na sabirnicama, odnosno unutar štićenog područja. I pri zaštiti sabirnica možemo štićeno područje definirati kao područje među strujnim transformatorima, na koje je priključena diferencijalna zaštita.

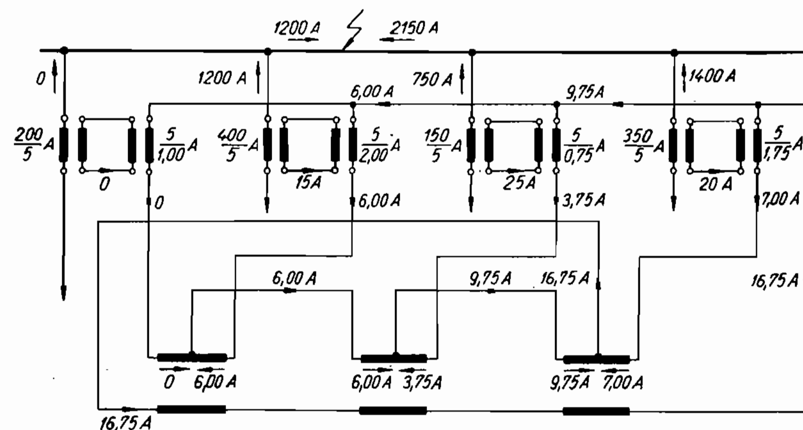
Postoji međutim razlika između diferencijalne zaštite sabirnica i diferencijalne zaštite transformatora. U prvom redu prijenosni omjeri strujnih transformatora u pojedinim odvodima nisu međusobno jednaki, pa radi uspoređivanja struja moramo upotrijebiti međutransformatore, kako bi se struje transformirale na međusobno usporedive veličine. Pri određivanju prijenosnog omjera međutransformatora mogu se upotrijebiti relacije (6.3) odnosno (6.4), u ovisnosti o nazivnoj struji releja. Osim toga, u slučaju kratkog spoja na jednom od vodova, ali izvan štićenog područja, ukupna struja kratkog spoja protječe kroz primarni namot strujnog transformatora u tom odvodu, dok kroz strujne transformatore ostalih odvoda protječe samo dio struje kratkog spoja, što izaziva različite strujne pogreške.

Zato je potrebno — da bi se spriječilo pogrešno djelovanje zaštite — da diferencijalna zaštita bude dobro stabilizirana.

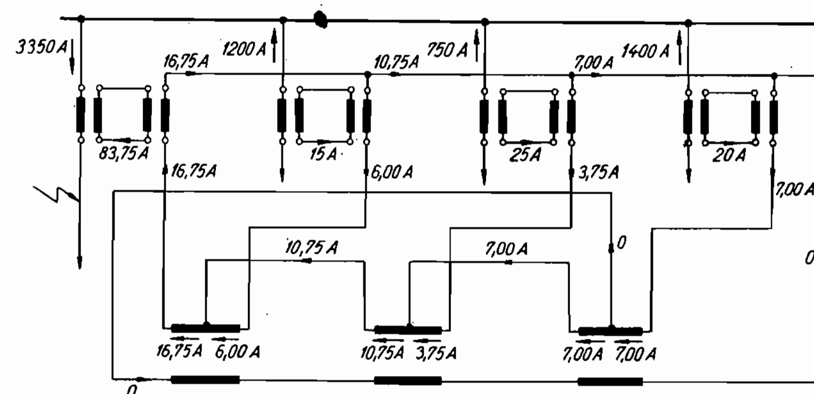
Stabiliziranje se izvodi na isti način kao za tronamotni transformator (sl. 7.102). Za sabirnice sa n odvoda treba predvidjeti $n-1$ releja, čiji su kontakti spojeni u seriju. Na sl. 7.110. prikazana je shema spoja zaštite sabirnica sa četiri odvoda. Radi pojednostavnjenja sheme spoja nacrtani su pomoćni strujni transformatori, spojni vodovi i releji samo u jednoj fazi. Potrebna su tri stabilizirana diferencijalna releja po fazi; pomoćni relej će djelovati i uključiti strujne krugove za okidanje svih četiriju sklopaka, ako prorade sva tri diferencijalna releja. To je nužno, jer bi struja pogreške mogla djelovati na zatvaranje kontakta onog releja kroz čije



Slika 7.110. Shema spoja diferencijalne zaštite sabirnica s relejima na principu vage (prikaz zaštite samo za jednu fazu)

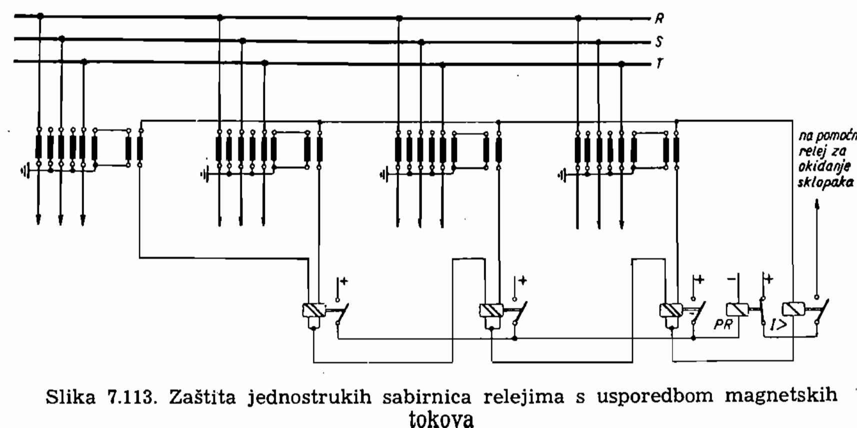


Slika 7.111. Struje u diferencijalnoj zaštiti sabirnica (pojednostavnjena shema zaštite prema sl. 7.110) za slučaj kvara unutar štićenog područja



Slika 7.112. Struje u diferencijalnoj zaštiti sabirnica (pojednostavnjena shema zaštite prema sl. 7.110) za slučaj kvara unutar štićenog područja

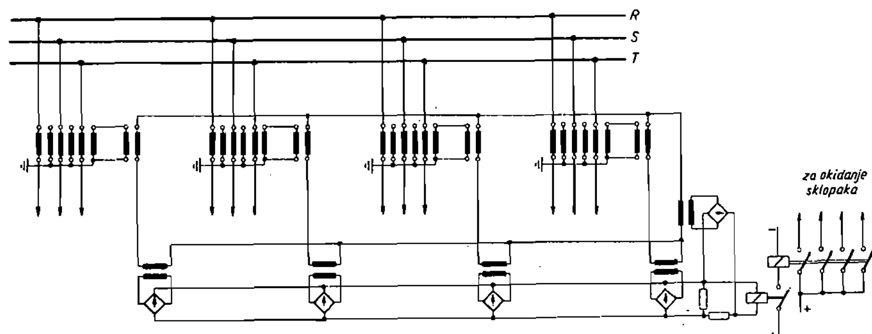
namote za stabilizaciju ne protječe struja, ako se spomenuti namoti napajaju iz strujnih transformatora u odvodima u kojima nema struje za vrijeme kratkog spoja. Na sl. 7.111. prikazane su struje pri kratkom spoju unutar štićenog područja, uz pretpostavku da su na jednom vodu priključeni samo potrošači (struja kratkog spoja jednaka nuli), da su struje kratkog spoja u fazi (što je normalno i slučaj), te da strujni transformatori transformiraju struje bez pogreške. Uz strujne transformatore u odvodima i uz pomoćne strujne transformatore naznačeni su prijenosni omjeri. Prijenosni omjeri za pomoćne strujne transformatore određeni su prema (6.3). Na sl. 7.112. prikazan je za isto rasklopno postrojenje slučaj kratkog spoja na potrošačkom odvodu. U drugom slučaju dobiva se znatno veća sila na strani namota za stabilizaciju, a znatno manja na strani namota kroz koji teče diferencija struja. Da se tačno odredi struja za slučajeve na sl. 7.111. i 7.112. bilo bi potrebno poznavati pogreške strujnih transfor-



Slika 7.113. Zaštita jednostrukih sabirnica relejima s usporedbom magnetskih tokova

matora, jer kad se uzmu pogreške u obzir, diferencija struja (na sl. 7.112) ne bi bila jednaka nuli.

Za zaštitu jednostrukih sabirnica mogu se upotrijebiti releji s usporedbom magnetskih tokova (sl. 7.82), ali tada je potreban poseban relej koji djeluje na diferenciju struja (sl. 7.113). Kad bilo u kojem releju s usporedbom magnetskih tokova (potrebno je $n - 1$ releja) postane zbroj tokova dovoljno velik zatvorit će njegovi kontakti (u ovom slučaju kontakti se nalaze na suprotnoj strani od one na sl. 7.82) i uzbudit će svitak



Slika 7.114. Zaštita jednostrukih sabirnica s ispravljanjem struja u vodovima i diferencije struje

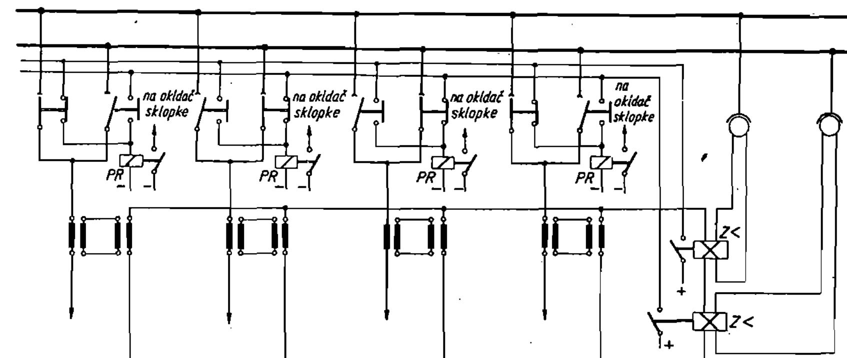
pomoćnog releja, koji će otvoriti mirni kontakt. Zbog toga neće doći do isklapanja sklopke i pored djelovanja releja kroz koji protječe diferencija struja. Sada je dovoljno da proradi samo jedan od releja s usporedbom magnetskih tokova pa da spriječi djelovanje zaštite, što je analogno zahtjevu da prorade svi releji na principu vage.

Ispravljanjem struja u pojedinim vodovima i usporedbom sume apsolutnih vrijednosti tih ispravljenih struja s njihovom ispravljenom diferencijom (sl. 7.114) moguće je postići selektivnost zaštite sabirnica. Udešenje djelovanja releja s obzirom na omjer sume i diferencije struje postiže se izborom otpora (sl. 7.80).

C. Zaštita dvostrukih sabirnica

Pri izvedbi zaštite dvostrukih i višestrukih sabirnica treba uzeti u obzir i činjenicu da odvodi mogu biti priključeni bilo na jedne, bilo na druge sabirnice, te da u slučaju kvara na sabirnicama treba isklopiti samo one odvode koji su priključeni na sabirnice na kojima je nastao kratki spoj.

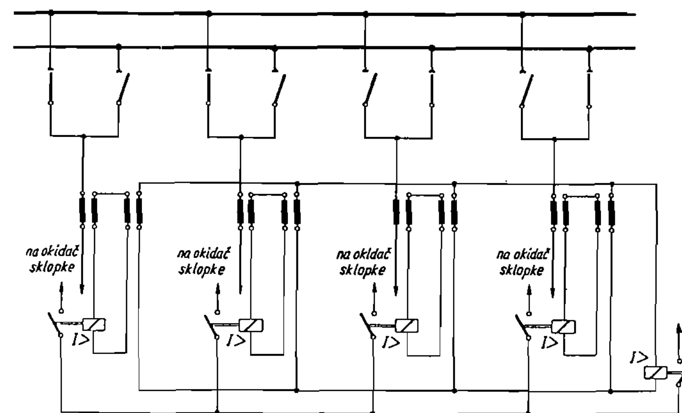
Na sl. 7.115. prikazana je zaštita dvostrukih sabirnica sa dva distantna releja, kroz koje protječe diferencija struja i koji su priključeni na naponske transformatore u mjernom polju. Pri određivanju diferencije struja uzimaju se u obzir svi odvodi, bez obzira na koje su sabirnice priključeni, jer će u normalnom pogonu i u slučaju kvara izvan štićenog područja diferencija struja biti jednaka nuli (uz pretpostavku da strujni trans-



Slika 7.115. Zaštita dvostrukih sabirnica distantnim relejima

formatori rade bez pogreške) svejedno da li su vodovi priključeni na jedan ili drugi sistem sabirnica. U slučaju kvara unutar štićenog područja za bilo koji sistem sabirnica pojavit će se diferencija struja. Sve to vrijedi i onda kad su sabirnice međusobno u sinhronizmu i kad rade u međusobno odvojenim mrežama. Brže će djelovati onaj distantni relej na koji djeluje manji napon, dakle onaj koji je spojen na sabirnice na kojima je došlo do kvara. Djelovanjem distantnog releja uključuje se napon na pomoćne sabirnice, čime se uzbuđuju pomoćni releji za uklapanje krugova za okidanje sklopaka. Pomoćni releji priključeni su preko kontakata spojenih s rastavljačem, pa će — prema položaju rastavljača — biti uzbuđeni pomoćni releji samo onih odvoda, koji su priključeni na sabirnice na kojima je nastao kvar. Isklapanjem sklopaka preko kojih se napajao kratki spoj nestat će diferencija struja, pa drugi distantni relej neće ni proraditi, iako je bio uzbuđen.

Još jednostavnija izvedba prikazana je na sl. 7.116. Upotrebljeni su nadstrujni releji u svakom odvodu, a njihovo je djelovanje na sklopke



Slika 7.116. Zaštita dvostrukih sabirnica nadstrujnim relejima i diferencijalnim relejem

uvjetovano proradom releja kroz koji protječe diferencija struja. Selektivnost s obzirom na mjesto kvara postiže se uvjetom da do isklapanja sklopaka dolazi tek nakon što prorade oba releja, pa će biti iskopčani samo oni odvodi koji su spojeni na sabirnice na kojima je nastao kratki spoj.

Treba napomenuti da je stabilizacija diferencijalne zaštite dvostrukih sabirnica komplicirana, pa se zato ne izvodi. Zbog toga diferencijalni relej treba udesiti na relativno visoku struju, kako bi se spriječilo pogrešno djelovanje.

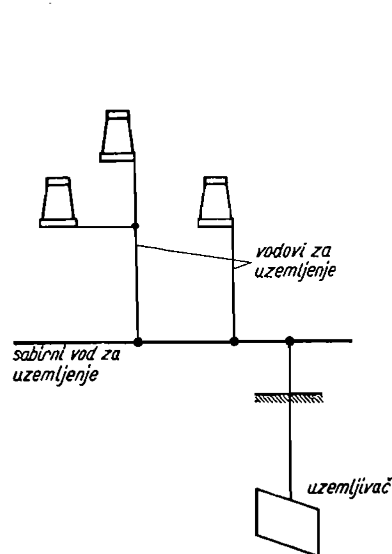
7.10. UZEMLJENJE U RASKLOPNOM POSTROJENJU

A. Općenito o uzemljenju

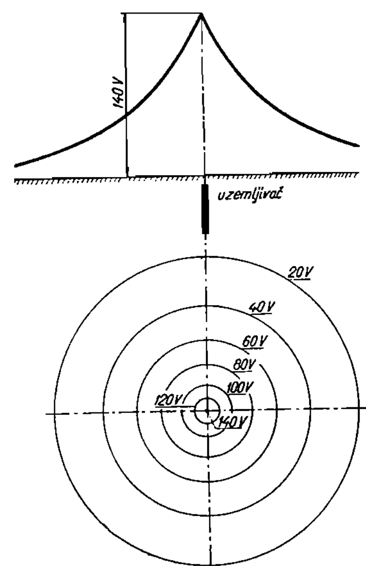
Pod uzemljenjem razumijevamo vodljivi spoj neke tačke mreže, ili dijela postrojenja, koje iz bilo kojih razloga može doći pod napon, sa zemljom preko uzemljivača.

S obzirom na uloge uzemljenja razlikujemo: pogonsko i zaštitno uzemljenje i uzemljenje odvodnika prenapona.

Uzemljenje dijela mreže u normalnom pogonu nazivamo pogonskim uzemljenjem. Tu spada uzemljenje nul-tačke transformatora, svejedno da li se radi o neposrednom ili posrednom uzemljenju; u pogonska uzemljenja ubrajamo i uzemljenje nul-tačke sloga jednopolnih naponskih transformatora.

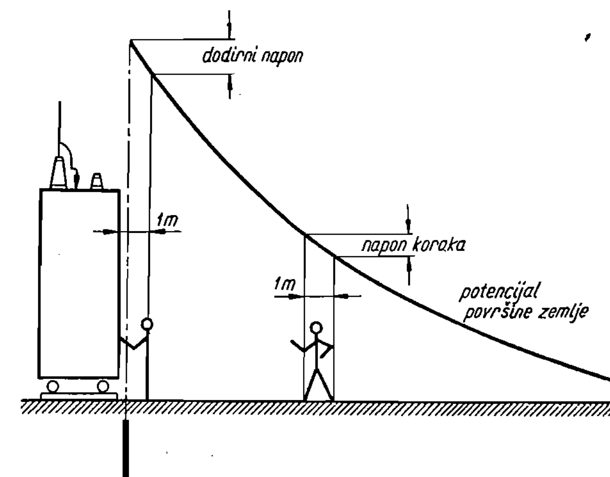


Slika 7.117. Principijelna izvedba uzemljenja

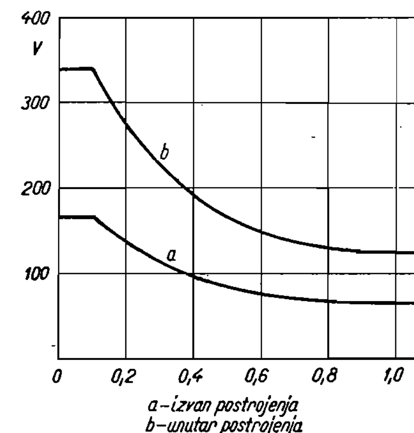


Slika 7.118. Potencijal zemlje i ekvipotencijalne linije oko cijevnog uzemljivača

U zaštitna uzemljenja može se ubrojiti uzemljenje sekundarnih namota strujnih i naponskih transformatora, uzemljenje dijelova koji u slučaju kvara mogu doći pod napon i uzemljenja za zaštitu osoblja za vrijeme rada na visokonaponskim dijelovima postrojenja. Treća vrst uzemljenja



Slika 7.119. Definicija dodirnog napona i napona koraka



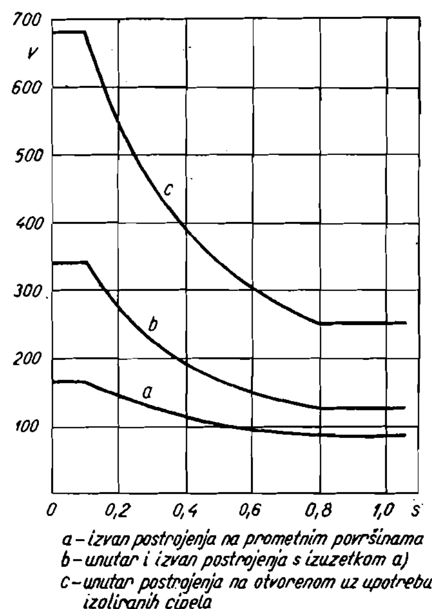
Slika 7.120. Maksimalno dozvoljeni dodirni naponi prema njemačkim propisima

ne služi samo za uzemljenje odvodnika prenapona, već i za odvođenje statičkih naboja, lutajućih struja (u kabelskom plaštu) i sl.

Principijelna izvedba uzemljenja prikazana je na sl. 7.117. Dijelovi koje treba uzemljiti (potporni izolatori na sl. 7.117) spojeni su vodovima

uzemljenja na sabirni vod uzemljenja, a ovaj preko voda uzemljivača na uzemljivač.

Veličina struje koja protječe kroz vodove do uzemljivača i kroz sam uzemljivač ovisi o načinu uzemljenja nul-tačke mreže. Prolazom struje kroz uzemljivač u zemlju dolazi površina zemlje pod napon (naravno da to vrijedi i za slojeve ispod površine, ali za zaštitu su važne prilike na površini zemlje), pa između pojedinih tačaka vlada razlika potencijala. Oblik i razmak ekvipotencijalnih linija oko uzemljivača ovisi o obliku uzemljivača, o veličini struje i o specifičnom otporu zemlje, dok je napon uzemljivača jednak produktu struje kroz uzemljivač i otpora uzemljenja. Pod otporom uzemljenja razumijevamo otpor zemlje između uzemljivača



Slika 7.121. Maksimalno dozvoljeni naponi koraka prema njemačkim propisima

i neke dovoljno udaljene tačke od uzemljiavča, u kojoj je potencijal zemlje praktički jednak nuli. Na sl. 7.118. prikazan je primjer promjene potencijala površine zemlje i ekvipotencijalne linije oko cijevnog uzemljivača.

Pri određivanju da li je uzemljenjem postignuta dovoljna sigurnost mjerodavna su dva napona: dodirni napon i napon koraka. Oba napona su definirana na sl. 7.119. Dopušteni dodirni naponi i naponi koraka u ovisnosti o trajanju struje kroz uzemljivač prikazani su prema njemačkim propisima na sl. 7.120. i 7.121.

B. Određivanje otpora uzemljenja i potencijala na površini zemlje

a) Općenito

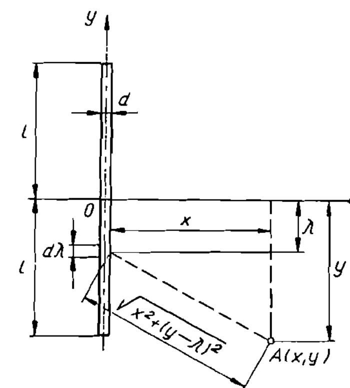
Otpor uzemljenja, kako je već spomenuto, ovisi i o otporu zemlje, koji je ovisan o sastavu tla, njegovoj vlažnosti i temperaturi. Uobičajeno je da se računa sa specifičnim otporom zemlje u Ωm, što je definirano kao otpor kocke zemlje volumena 1 m³. Red veličine specifičnog otpora zemlje iznosi (Lit. 105)

treset, humus (vlažan)	10 Ωm
treset, humus (suh)	10^2 Ωm
sitan, vrlo vlažan pijesak	10^2 Ωm
sitan, suh pijesak	10^3 Ωm
kompaktna stijena, suh beton	10^5 Ωm

Potpuno suha zemlja je izolator. Sloj zemlje osušen djelovanjem sunca i vjetra vlada se približno kao izolator. Debljina tako isušenog sloja ovisi o klimatskim prilikama. Slične prilike s obzirom na otpor zemlje imamo u smrznutom sloju zemlje. Zbog toga uzemljivače ne treba postavljati u slojeve koji će ljeti biti osušeni, odnosno zimi smrznuti. Osim toga i postotak vlage mijenja se s doba godine, pa se specifični otpor zemlje mijenja u vrlo širokim granicama. Tek na dubini od 3 m ispod površine specifični otpor zemlje postaje konstantniji i manje ovisan o atmosferskim prilikama (Lit. 107).

b) Pojedinačni uzemljivači

Odredimo najprije prilike kad je uzemljivač izveden kao cijev ili šipka. Izraz za otpor i potencijal zemlje određuje se na osnovu pretpostavke da se u zemlji, koja se proteže neograničeno oko uzemljivača,



Slika 7.122. Položaj štapnog ili cijevnog uzemljivača za određivanje potencijala površine zemlje i otpora uzemljenja

nalazi izvor struje iz kojega izvire jednoliko raspodijeljena struja. Duljina izvora struje jednaka je $2\,l$, gdje je l duljina uzemljivača. Ukupna struja iznosi $2\,I$, dakle dvostruka struja koja dotječe uzemljivaču duljine l. Ako os ordinata postavimo u os uzemljivača, a ishodište koordinatnog sistema u polovinu uzemljivača, položaj uzemljivača definiran je kao na sl. 7.122.

Iz dijela $d\lambda$, na udaljenosti λ od ishodišta koordinatnog sistema, izvire struja $2I\frac{d\lambda}{2l}$. Udaljenost tačke A (sl. 7.122) od elementa $d\lambda$ iznosi $\sqrt{x^2 + (y-\lambda)^2}$. Potencijal tačke A, zbog struje koja izvire iz elementa $d\lambda$, iznosi

$$d\varphi = 2I\frac{d\lambda}{2l}\frac{\varrho}{4\pi\sqrt{x^2+(y-\lambda)^2}} \qquad \ldots (7.168)$$

gdje je ϱ specifični otpor zemlje. Izraz (7.168) izlazi iz relacije

$$\varphi = \frac{i}{4\pi r}\varrho \qquad \ldots (7.169)$$

gdje su i struja tačkaste elektrode, a r udaljenost promatrane tačke od elektrode.

Uzimajući u obzir ukupnu duljinu uzemljivača, potencijal tačke A iznosi

$$\varphi = 2I\frac{\varrho}{8\pi l}\int_{-l}^{+l}\frac{d\lambda}{\sqrt{x^2+(y-\lambda)^2}} =$$

$$= 2I\frac{\varrho}{8\pi l}\ln\frac{\sqrt{x^2+(y+l)^2}+y+l}{\sqrt{x^2+(y-l)^2}+y-l} \qquad \ldots (7.170)$$

Ako potencijal promatramo u ravnini okomito na os y određujemo ga iz (7.170) postavljanjem $y = 0$; ako još postavimo da je $x = ml$, dobivamo

$$\varphi = 2I\frac{\varrho}{8\pi l}\ln\frac{\sqrt{m^2+1}+1}{\sqrt{m^2+1}-1} = 2I\frac{\varrho}{8\pi l}\ln K \qquad \ldots (7.171)$$

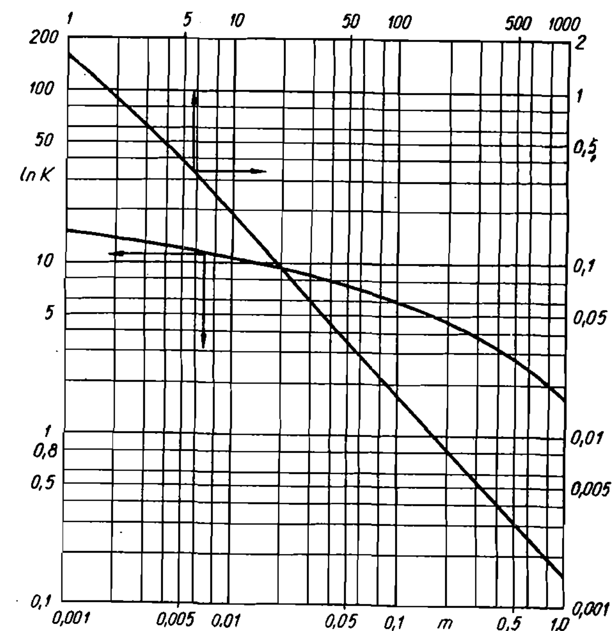
Vrijednosti $\ln K$ u ovisnosti o m prikazane su na sl. 7.123.

Potencijal u sredini cijevi, dakle za $y = 0$ i za $x = \frac{d}{2}$, prema (7.170) iznosi

$$\varphi_o = 2I\frac{\varrho}{8\pi l}\ln\frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2+l^2}+l}{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2+l^2}-l} \qquad \ldots (7.172)$$

Vrijednost korijena možemo napisati ovako

$$l\sqrt{1+\left(\frac{d}{2l}\right)^2} \cong l + \frac{d^2}{8l} \qquad \ldots (7.173)$$



Slika 7.123. Ovisnost $\ln K$ o m (7.171) $\left(\ln K = \ln\frac{\sqrt{m^2+1}+1}{\sqrt{m^2+1}-1}\right)$

jer je $\sqrt{1+a} \cong 1 + \frac{a}{2}$, kad je $a \ll 1$. Odatle slijedi — uzimajući još u obzir da je $\frac{d^2}{8l} \ll l$

$$\varphi_o = 2I\frac{\varrho}{8\pi l}\ln\frac{16l^2}{d^2} = 2I\frac{\varrho}{4\pi l}\ln\frac{4l}{d} \qquad \ldots (7.174)$$

Potencijal φ_o jednak je naponu na promatranom mjestu, u usporedbi s nekom dovoljno udaljenom tačkom u kojoj je potencijal praktički jednak nuli. Otpor uzemljenja dobiva se kao omjer napona i struje, pa je

$$R' = \frac{\varrho}{4\pi l}\ln\frac{4l}{d} \qquad \ldots (7.175a)$$

Otpor R' dobiven je uz pretpostavku da je duljina cijevi $2l$ i da se cijela ta duljina nalazi u zemlji. U stvari se radi o uzemljivaču duljine l, pa otpor uzemljenja ima dvostruku vrijednost, kao da je otpor R' sastavljen od dva jednaka otpora R. Otpor uzemljenja iznosi dakle

$$R = 2R' = \frac{\varrho}{2\pi l}\ln\frac{4l}{d} \qquad \ldots (7.175b)$$

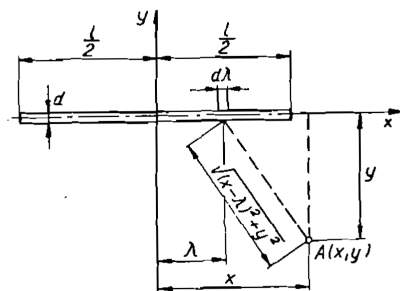
gdje su R otpor u omima, ϱ specifični otpor u Ω m, l duljina uzemljivača u m, a d promjer uzemljivača također u m.

Napon koraka možemo odrediti kao razliku potencijala na duljini koraka (S), pa je prema (7.171)

$$u_S = I \frac{\varrho}{4\pi l}\left[\ln \frac{\sqrt{m^2+1}+1}{\sqrt{m^2+1}-1} - \ln \frac{\sqrt{(m+a)^2+1}+1}{\sqrt{(m+a)^2+1}-1}\right] \quad \ldots (7.176)$$

gdje je $a = \frac{S}{l}$. Vrijednost logaritama mogu se odrediti iz dijagrama sa sl. 7.123. uzimajući jednom vrijednost m, a drugi put vrijednost $m + a$, kao polaznu veličinu. Najveći napon koraka dobivamo ako postavimo $m = \frac{d}{2l}$, a za $m + a = \frac{d+2}{2l}$, jer je duljina koraka $S = 1$ m.

Kad je uzemljivač izveden kao traka ili uže, prilikom određivanja potencijala na površini zemlje i otpora uzemljenja možemo poći od sl. 7.124. Opet se oko uzemljivača neograničeno proteže zemlja, te iz



Slika 7.124. Položaj trakastog uzemljivača za određivanje potencijala površine zemlje i otpora uzemljenja

njega izvire struja $2I$. Potencijal tačke A zbog struje iz elementa $d\lambda$ iznosi

$$d\varphi = 2I \frac{d\lambda}{l} \frac{\varrho}{4\pi\sqrt{(x-\lambda)^2+y^2}} \quad \ldots (7.177)$$

Integriranjem od $-\frac{l}{2}$ do $+\frac{l}{2}$ dobiva se

$$\varphi = 2I \frac{\varrho}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{\left(x+\frac{l}{2}\right)^2+y^2}+x+\frac{l}{2}}{\sqrt{\left(x-\frac{l}{2}\right)^2+y^2}+x-\frac{l}{2}} \quad \ldots (7.178)$$

Potencijal u sredini uzemljivača $\left(x = 0;\ y = \frac{d}{2}\right)$ iznosi

$$\varphi_0 = 2I \frac{\varrho}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2}+\frac{l}{2}}{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2}-\frac{l}{2}}, \quad \ldots (7.179)$$

pa nakon postavljanja da je

$$\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2} = \frac{l}{2}\sqrt{1+\left(\frac{d}{l}\right)^2} \cong \frac{l}{2}+\frac{d^2}{4l}$$

i uz zanemarenje $\frac{d^2}{4l}$ prema $\frac{l}{2}$, dobiva se

$$\varphi_0 = 2I \frac{\varrho}{4\pi l} \ln \frac{l}{\frac{d^2}{4l}} = 2I \frac{\varrho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{d} \quad \ldots (7.180)$$

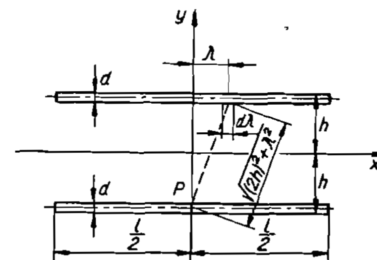
Otpor uzemljenja za cijeli uzemljivač iznosi

$$R' = \frac{\varrho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{d} \quad \ldots (7.181)$$

a uzdužnim dijeljenjem uzemljivača, što odgovara uzemljivaču ukopanom uz samu površinu zemlje, otpor uzemljenja postaje

$$R = 2R' = \frac{\varrho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d} \quad \ldots (7.182)$$

U praksi se uzemljivač od trake ili užeta postavlja ispod površine zemlje, pod slojem koji se smrzava zimi, odnosno prosušuje ljeti. Da



Slika 7.125. Položaj trakastog uzemljivača za određivanje otpora uzemljenja

bismo odredili potencijal, pretpostavimo da postoji zrcalno postavljen uzemljivač, s tim da je linija površine zemlje os simetrije (sl. 7.125). Da odredimo otpor uzemljenja, izračunajmo potencijal tačke P u sredini uzemljivača. Za to treba zbrojiti djelovanja struje u uzemljivaču i u

njegovoj zrcalnoj slici. Potencijal radi struje u samom uzemljivaču određen je relacijom (7.180), uz napomenu da kroz uzemljivač ne teče struja $2\,I$, već samo struja I. Djelovanje struje u elementu $d\,\lambda$ zrcalne slike uzemljivača određeno je relacijom

$$d\,\varphi = I\,\frac{d\,\lambda}{l}\,\frac{\varrho}{4\,\pi\sqrt{(2\,h)^2+\lambda^2}} \qquad \ldots (7.183)$$

Integracijom u granicama od $-\frac{l}{2}$ do $+\frac{l}{2}$ dolazi se do ukupnog potencijala tačke radi struje u zrcalnoj slici uzemljivača. Zbrajanjem se dobiva ukupni potencijal tačke P

$$\varphi_0 = I\,\frac{\varrho}{2\,\pi\,l}\left[\ln\frac{2\,l}{d}+\frac{1}{2}\ln\frac{\sqrt{(2\,h)^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2}+\frac{l}{2}}{\sqrt{(2\,h)^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2}-\frac{l}{2}}\right] \qquad \ldots (7.184)$$

Dijeljenjem sa strujom I dobiva se otpor uzemljenja, koji se sastoji od dva člana: prvi je jednak otporu R', jer se sada radi o punom presjeku uzemljivača. Drugi član predstavlja utjecaj ukopanja uzemljivača. Pri određivanju otpora uzemljenja i u ovom se slučaju može upotrijebiti dijagram sa sl. 7.123. Tada izraz za otpor uzemljenja glasi

$$R = \frac{\varrho}{2\,\pi\,l}\left(\ln\frac{2\,l}{d}+\frac{1}{2}\ln\frac{\sqrt{m^2+1}+1}{\sqrt{m^2+1}-1}\right) \qquad \ldots (7.185)$$

gdje je

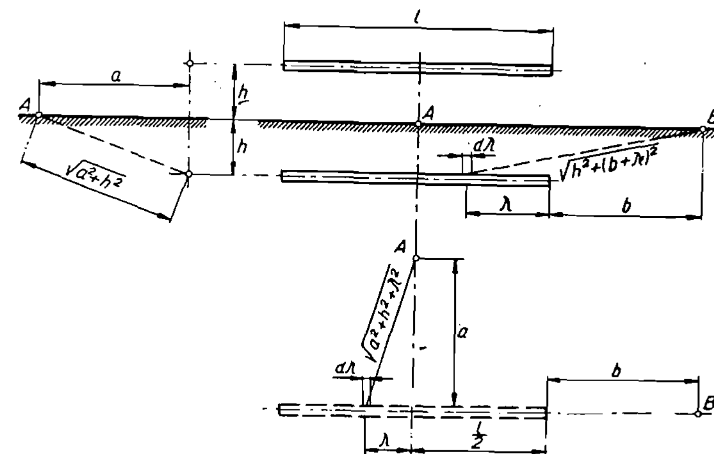
$$m = \frac{4\,h}{l} \qquad \ldots (7.186)$$

Da se odredi potencijal na površini zemlje, može se poći od sl. 7.126. Pomoću nje se lako određuje potencijal okomito na smjer uzemljivača i to upravo u njegovoj sredini (tačka A) i potencijal u produljenju uzemljivača (tačka B). U prvom slučaju — okomito na uzemljivač — potencijal površine zemlje određuje se kao zbroj djelovanja uzemljivača i njegove zrcalne slike, s time da su ta dva djelovanja međusobno jednaka. Ako prepostavimo da kroz svaki uzemljivač teče struja I, djelovanjem struje u elementu $d\,\lambda$ dolazi se do potencijala

$$d\,\varphi = 2\,I\,\frac{d\,\lambda}{l}\,\frac{\varrho}{4\,\pi\sqrt{a^2+h^2+\lambda^2}} \qquad \ldots (7.187)$$

odakle se integriranjem u granicama od $-\frac{l}{2}$ do $+\frac{l}{2}$ dobiva

$$\varphi = I\,\frac{\varrho}{2\,\pi\,l}\ln\frac{\sqrt{a^2+h^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2}+\frac{l}{2}}{\sqrt{a^2+h^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2}-\frac{l}{2}} \qquad \ldots (7.188)$$



Slika 7.126. Određivanje potencijala na površini zemlje okomito na uzemljivač u polovini duljine uzemljivača (A) i u smjeru uzemljivača (B)

I ovaj izraz možemo odrediti pomoću dijagrama sa sl. 7.123, ako za m postavimo

$$m = 2\,\frac{\sqrt{a^2+h^2}}{l} \qquad \ldots (7.189)$$

Uz iste pretpostavke za tačku B u smjeru uzemljivača imamo

$$d\,\varphi = 2\,I\,\frac{d\,\lambda}{l}\,\frac{\varrho}{4\,\pi\sqrt{h^2+(b+\lambda)^2}} \qquad \ldots (7.190)$$

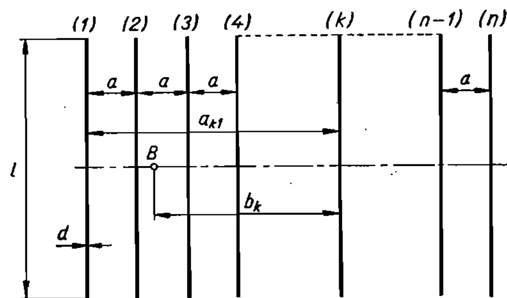
pa nakon integriranja u granicama od 0 do l dobivamo

$$\varphi = I\,\frac{\varrho}{2\,\pi\,l}\ln\frac{\sqrt{h^2+(b+l)^2}+b+l}{\sqrt{h^2+b^2}+b} \qquad \ldots (7.191)$$

c) Sastavljeni uzemljivači

U većim postrojenjima nije dovoljno postaviti pojedinačan uzemljivač, već se to izvodi sa više međusobno spojenih uzemljivača. U nekim jednostavnijim slučajevima moguće je provesti tačniji račun, iako se već pri nešto većem broju uzemljivača dolazi do mnogo jednadžbi. To vrijedi za uzemljenje s istim tipom uzemljivača (samo cijevni ili samo trakasti), dok je proračun pri raznim tipovima uzemljivača praktički nemoguć. Tada se računa jednom samo za cijevne, a drugi put samo za trakaste uzemljivače, pa se kao otpor uzemljenja uzima manja vrijednost. Radi zajedničkog djelovanja ukupni otpor nešto je manji od izračunatog.

Postupak pri određivanju otpora uzemljenja prikazat ćemo na sastavljenom uzemljivaču, koji se sastoji od n paralelnih traka (sl. 7.127) položenih u zemlju neposredno uz površinu, jer se utjecaj normalne dubine ukopavanja (oko 1 m) može zanemariti radi velike površine koju pokrivaju trake uzemljivača. U tom se slučaju zrcalno postavljeni uzemljivač nalazi neposredno položen na uzemljivač. Tako spojen uzemljivač vodi dvostruku struju ($2\,I$). Potencijal uzemljivača (1) kroz koji protječe struja



Slika 7.127. Sastavljeni uzemljivač od n trakastih uzemljivača

$2\,I_1$ određen je kao zbroj djelovanja struje u samom njemu i djelovanja svih ostalih uzemljivača. Potencijal radi struje u promatranom uzemljivaču određen je relacijom (7.180), pa je

$$\varphi_{11} = 2\,I_1 \frac{\varrho}{2\,\pi\,l} \ln \frac{2\,l}{d} = I_1\,k_{11} \qquad \ldots (7.192)$$

(Indeksi 11 znače da se radi o potencijalu trake 1 radi struje u istoj traci.) Potencijal uzemljivača (1) radi struje u k-toj traci određuje se prema drugom članu izraza (7.184)

$$\varphi_{k1} = 2\,I_k \frac{\varrho}{4\,\pi\,l} \ln \frac{\sqrt{m_{k1}^2 + 1} + 1}{\sqrt{m_{k1}^2 + 1} - 1} = I_k\,k_{k1} \qquad \ldots (7.193)$$

gdje je

$$m_{k1} = 2\frac{a_{k1}}{l} = 2\,\frac{(k-1)\,a}{l} \qquad \ldots (7.194)$$

U (7.194) a_{k1} jest udaljenost između prve i k-te trake, koja je jednaka $(k-1)\,a$ kad se radi o međusobno jednako udaljenim trakama. Relacijama (7.192) i (7.193) definirana je vrijednost koeficijenata k_{11} i k_{k1}, koje ćemo u daljem razmatranju upotrebljavati zbog pojednostavnjenja. Zbrajanjem djelovanja struja u svim trakama dobiva se potencijal za svaku traku, pa se na taj način dobiva onoliko jednadžba koliko ima traka. Pri tome treba uzeti u obzir da su sve trake međusobno spojene, pa uz dovoljno dimenzioniran dovod može se računati da su sve trake na istom potencijalu. Prema tome postoji slijedeći sistem jednadžba

$$\varphi = I_1\,k_{11} + I_2\,k_{21} + I_3\,k_{31} + \ldots + I_{n-1}\,k_{(n-1)1} + I_n\,k_{n1}$$

$$\varphi = I_1\,k_{12} + I_2\,k_{22} + I_3\,k_{32} + \ldots + I_{n-1}\,k_{(n-1)2} + I_n\,k_{n2} \qquad \ldots (7.195)$$

$$\ldots$$

$$\varphi = I_1\,k_{1n} + I_2\,k_{2n} + I_3\,k_{3n} + \ldots + I_{n-1}\,k_{(n-1)n} + I_n\,k_{nn}$$

Pri simetričnom razmještaju traka postoji i simetričnost raspodjele struja, pa je $I_1 = I_n$; $I_2 = I_{n-1}$ itd. Osim toga postoje jednakosti $k_{11} = k_{22} = \ldots = k_{nn}$, te jednakosti $k_{12} = k_{21}$, $k_{13} = k_{31}$ ili općenito $k_{ik} = k_{ki}$, pa se od n dolazi na $\frac{n}{2}$ jednadžba. Kad uzmemo sve to u obzir, sistem jednadžba glasi

$$\varphi = I_1\,(k_{11} + k_{n1}) + I_2\,(k_{21} + k_{(n-1)1}) + \ldots$$

$$\varphi = I_1\,(k_{21} + k_{n2}) + I_2\,(k_{22} + k_{(n-1)2}) + \ldots \qquad \ldots (7.196)$$

$$\varphi = I_1\,(k_{31} + k_{n3}) + I_2\,(k_{32} + k_{(n-1)3}) + \ldots$$

Iz tih jednadžba može se odrediti struja u svakoj traci. Struja se dobiva u obliku

$$I_k = \alpha_k\,\varphi \qquad \ldots (7.197)$$

dok je ukupna struja

$$I = \varphi \sum_{1}^{n} \alpha_k \qquad \ldots (7.198)$$

pa je otpor uzemljenja

$$R = \frac{\varphi}{I} = \frac{1}{\sum_{1}^{n} \alpha_k} \qquad \ldots (7.199)$$

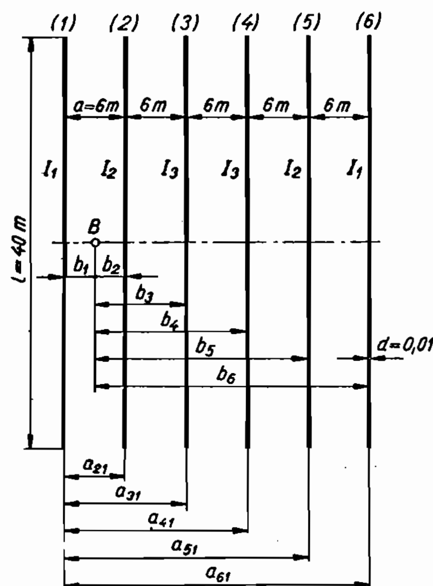
Potencijal tačke B (sl. 7.127) u simetrali sastavljenog uzemljivača okomitoj na trake određuje se prema relaciji (7.178), ako se postavi $x = 0$ i $y = b_k$, gdje je b_k udaljenost tačke za koju tražimo potencijal od k-te trake. Uzimajući u obzir sve trake, potencijal promatrane tačke određuje se iz relacije

$$\varphi_b = \frac{\varrho}{2\,\pi\,l} \sum_{k=1}^{n} I_k \ln \frac{\sqrt{m_k^2 + 1} + 1}{\sqrt{m_k^2 + 1} - 1} \qquad \ldots (7.200)$$

gdje je

$$m_k = 2\,\frac{b_k}{l} \qquad \ldots (7.201)$$

Da bismo ukazali na primjenu izvedenih formula, odredimo otpor uzemljenja uzemljivača sastavljenog od 6 užeta promjera $d = 10$ mm, duljine $l = 40$ m, međusobne udaljenosti $a = 6$ m (sl. 7.128). Kad



Slika 7.128. Raspored uzemljivača za primjer proračuna uzemljenja

uzmemo u obzir simetričnost rasporeda uzemljivača, možemo postaviti da je $I_1 = I_6$, $I_2 = I_5$ i $I_3 = I_4$, pa jednadžbe za potencijal glase

$$\varphi = I_1 (k_{11} + k_{61}) + I_2 (k_{21} + k_{51}) + I_3 (k_{31} + k_{41})$$
$$\varphi = I_1 (k_{12} + k_{62}) + I_2 (k_{22} + k_{52}) + I_3 (k_{32} + k_{42}) \quad \ldots (7.202)$$
$$\varphi = I_1 (k_{13} + k_{63}) + I_2 (k_{23} + k_{53}) + I_3 (k_{33} + k_{43})$$

Osim toga, radi simetričnosti možemo postaviti

$$k_{11} = k_{22} = k_{33} = 5{,}315$$
$$k_{21} = k_{12} = k_{32} = k_{23} = k_{43} = 1{,}529$$
$$k_{31} = k_{13} = k_{42} = k_{53} = 1{,}025$$
$$k_{41} = k_{52} = k_{63} = 0{,}764$$
$$k_{51} = k_{62} = 0{,}605$$
$$k_{61} = 0{,}498$$

Vrijednosti koeficijenata određene su iz (7.192), odnosno (7.193), uz pretpostavku da je $\varrho = 100\ \Omega$m. Jednadžbe (7.202) dakle glase

$$\varphi = 5{,}813\, I_1 + 2{,}134\, I_2 + 1{,}789\, I_3$$
$$\varphi = 2{,}134\, I_1 + 6{,}079\, I_2 + 2{,}554\, I_3$$
$$\varphi = 1{,}789\, I_1 + 2{,}554\, I_2 + 6{,}844\, I_3$$

pa su rješenja

$$I_1 = 0{,}111\, \varphi$$
$$I_2 = 0{,}092\, \varphi$$
$$I_3 = 0{,}083\, \varphi$$

dok je ukupna struja (7.198)

$$I = 0{,}572\, \varphi$$

a otpor uzemljenja (7.199)

$$R = 1{,}75\ \Omega$$

Otpor uzemljenja iste duljine užeta, ali položenog u pravcu, iznosio bi (7.182) $R = 1{,}43\ \Omega$, jer tada nema međusobnih utjecaja uzemljivača.

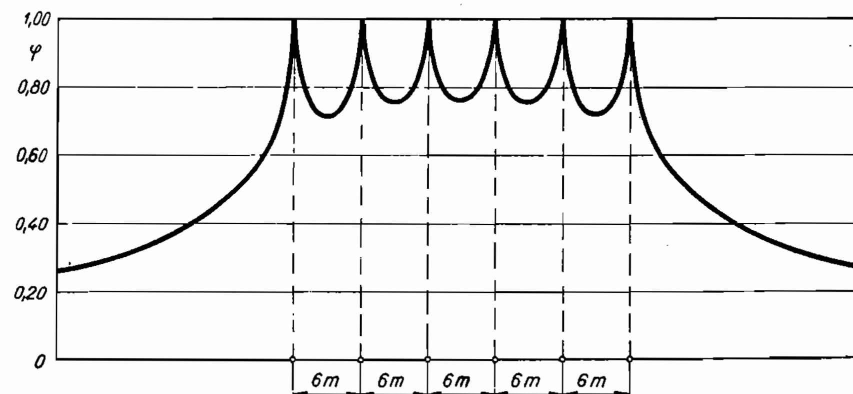
Odredimo još potencijal u tački B (sl. 7.128) na polovini razmaka između uzemljivača (1) i (2). Vrijednosti za m_k (7.201) iznose $m_1 = m_2 = 0{,}15$; $m_3 = 0{,}45$; $m_4 = 0{,}75$; $m_5 = 1{,}05$ i $m_6 = 1{,}35$, pa su sumandi prema (7.200)

$$\varphi_b = \frac{100}{2\pi \cdot 40}\, \varphi\, (0{,}111 \cdot 5{,}22 + 0{,}092 \cdot 5{,}22 + 0{,}083 \cdot 3{,}08 +$$
$$+ 0{,}083 \cdot 2{,}20 + 0{,}092 \cdot 1{,}70 + 0{,}111 \cdot 1{,}38) = 0{,}721\, \varphi$$

Na sl. 7.129. prikazan je potencijal površine zemlje na polovini duljine uzemljivača.

U slučaju upotrebe cijevnih uzemljivača postupa se analogno. Potencijal radi struje u promatranom uzemljivaču određuje se prema (7.174)

$$\varphi_{11} = I_1 \frac{\varrho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} = I_1 k_{11} \quad \ldots (7.203)$$



Slika 7. 129. Potencijal na površini zemlje u polovini duljine uzemljivača za raspored prikazan na sl. 7.128.

a potencijal promatranog uzemljivača radi struje u k-tom uzemljivaču prema (7.171)

$$\varphi_{k1} = I_k \frac{\varrho}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{m^2_{k1}+1}+1}{\sqrt{m^2_{k1}+1}-1} = I_k k_{k1} \qquad \ldots (7.204)$$

gdje je

$$m_{k1} = \frac{a_{k1}}{l} \qquad \ldots (7.205)$$

U (7.205) je a_{k1} udaljenost između cijevi (1) i cijevi (k), dok je l duljina cijevi. Poznavajući koeficijente k, otpor uzemljenja i potencijal na površini zemlje određuju se na već opisani način.

Cijevni uzemljivači mogu se izvesti tako da su svi smješteni na krugu u vrhovima pravilnog mnogokuta. U tom su slučaju struje u svim cijevima međusobno jednake, čime proračun postaje znatno jednostavniji. Tada potencijal svakog uzemljivača iznosi

$$\varphi = \frac{I}{n} \frac{\varrho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{d} + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^{n} \ln \frac{\sqrt{m^2_{k1}+1}+1}{\sqrt{m^2_{k1}+1}-1} \right) \ldots (7.206)$$

gdje su n broj uzemljivača, a m_{k1} omjer definiran relacijom (7.205). Pri određivanju potencijala bilo koje tačke na površini zemlje može se poći od relacije (7.204), s tim da se mjesto m_{k1} postavi omjer m_k, koji je definiran relacijom

$$m_k = \frac{b_k}{l} \qquad \ldots (7.207)$$

gdje je b_k udaljenost promatrane tačke od k-tog uzemljivača. Uzimajući u obzir utjecaj svih uzemljivača, potencijal promatrane tačke iznosi

$$\varphi_b = \frac{I}{n} \frac{\varrho}{4\pi l} \sum_{k=1}^{n} \ln \frac{\sqrt{m^2_k+1}+1}{\sqrt{m^2_k+1}-1} \qquad \ldots (7.208)$$

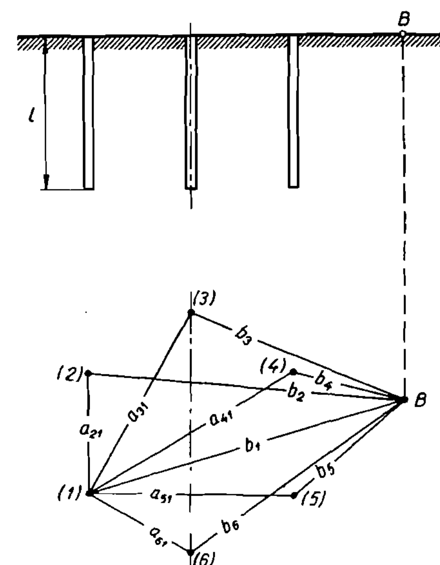
Osim toga, moguće je provesti približan proračun uzemljenja. Otpor uzemljenja paralelno položenih uzemljivača u dubini od oko 1 m (duljina pojedine trake l m, međusobni razmak a m, s tim da je $\frac{a}{l} \leqq 0{,}2$) može se približno odrediti iz formule

$$R = \frac{0{,}55\,\varrho}{\sqrt{F}} \qquad \ldots (7.209)$$

gdje F u m² površina pokrivena uzemljivačem. Za n paralelnih traka s jednakim međusobnim razmacima a površina F određuje se iz formule

$$F = (n-1)\,a\,l \qquad \ldots (7.210)$$

Formula za R tačno vrijedi za raspored uzemljivača unutar kvadrata, tj. kad je $(n-1)\,a = l$. Npr. pri dvije paralelne trake s razmakom $a \leqq 0{,}2\,l$ formula (7.209) daje oko 25% veći otpor uzemljenja od onoga koji se stvarno pojavljuje. Određivanje tako jednostavnog uzemljenja lako je prema već navedenim formulama.



Slika 7.130. Simetrični raspored cijevnih uzemljivača

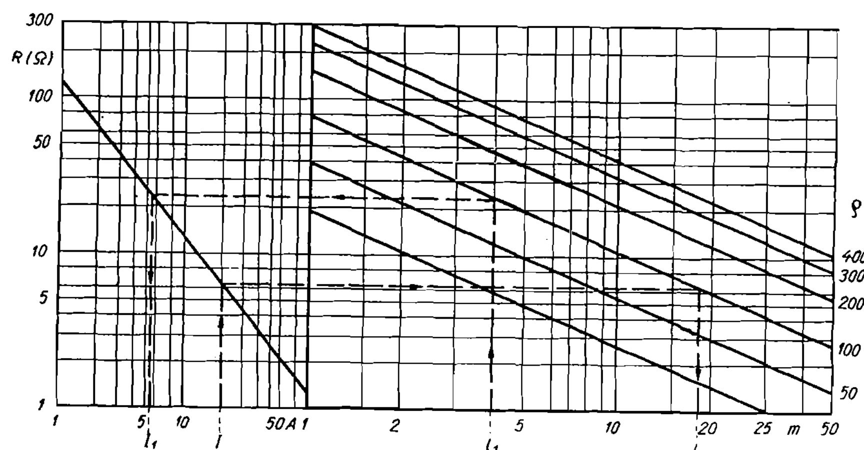
TABLICA 7.1.

Približna raspodjela struja u trakastim, paralelno postavljenim uzemljivačima, u ovisnosti o ukupnom broju traka
(udaljenost među trakama 0,1 do 0,2 duljine trake)

Redni broj uzemljivača	Ukupni broj uzemljivača								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	50	36	28	24	21	19	17	15	14
2.	50	28	22	18	15	14	13	12	11
3.	—	36	22	16	14	12	11	10	9,5
4.	—	—	28	18	14	10	9	9	8
5.	—	—	—	24	15	12	9	8	7,5
6.	—	—	—	—	21	14	11	9	7,5
7.	—	—	—	—	—	19	13	10	8
8.	—	—	—	—	—	—	17	12	9,5
9.	—	—	—	—	—	—	—	15	11
10.	—	—	—	—	—	—	—	—	14

Pri određivanju potencijala potrebno je, nadalje, poznavati struje u pojedinim uzemljivačima. To je moguće odrediti na već opisani način. Približna raspodjela struje u procentima od ukupne struje može se odrediti iz tab. 7.1. koja vrijedi za omjer $\frac{a}{l} = 0{,}1$ do $0{,}2$. Kad poznajemo struje u pojedinim uzemljivačima, potencijal na površini zemlje određujemo prema (7.200).

Duljina i broj cijevnih uzemljivača, koji dolaze u obzir za transformatorske stanice nižeg napona i one višeg napona, ako imaju izoliranu nultačku ili nul-tačku transformatora uzemljenu preko prigušnice, može se približno odrediti prema dijagramu sa sl. 7.131. Potreban otpor uzemljenja u ovisnosti o struji (lijevi dio dijagrama) određen je uz zahtjev da napon uzemljivača ne bude veći od 125 V, što traže njemački propisi za postrojenja koja nemaju neposredno uzemljenu nul-tačku. Desni dio dija-



Slika 7.131. Dijagram za određivanje broja i duljine cijevnih uzemljivača

grama prikazuje ovisnost otpora uzemljenja o duljini uzemljivača, prema (7.175b), za različite specifične otpore tla. Upotrebu dijagrama prikazat ćemo na primjeru. Neka struja zemnog spoja iznosi $I = 20$ A, pa je potreban otpor uzemljenja $R = 6{,}1$ Ω. Uz specifični otpor tla $\varrho = 100$ Ωm, potrebna duljina cijevnog uzemljivača jest $l = 18$ m, kad bi se postavio samo jedan uzemljivač. Tako dug uzemljivač neće biti normalno moguće izvesti, odnosno izvedba tako dugog uzemljivača bila bi skupa. Zbog toga se izvode uzemljivači manje duljine. Neka smo se, s obzirom na mogućnost zabijanja cijevi, odlučili na maksimalnu duljinu uzemljivača $l_1 = 4$ m. Ako nema međusobnog utjecaja među uzemljivačima, te ako napon na uzemljivaču ne smije biti veći od 125 V, kroz svaki od njih moći će protjecati struja $I_1 = 5{,}6$ A. Prema tome bit će dovoljno $n = 4$ uzemljivača

$$n = \frac{I}{I_1} = \frac{20}{5{,}6} = 3{,}6 \cong 4$$

Radi međusobnog utjecaja, otpor četiriju uzemljivača neće biti jednak četvrtini otpora jednog od njih, pa dopuštenu struju kroz svaki od uzemljivača treba množiti s korekcionim faktorom 0,85, ako razmak među uzemljivačima iznosi približno dvostruku duljinu uzemljivača. Uzimajući u obzir spomenuti korekcioni faktor, potrebno je uzemljivača

$$n = \frac{I}{0{,}85\, I_1} = \frac{20}{0{,}85 \cdot 5{,}6} = 4{,}2 \cong 5$$

Svaki proračun uzemljenja samo je približan, jer se provodi uz izvjesna zanemarenja i uz pretpostavku konstantnog specifičnog otpora zemlje, što normalno nije ispunjeno. Zbog toga je izvedeno uzemljenje potrebno mjerenjem kontrolirati, pa ga eventualno poboljšati ako ne zadovoliava uvjetima.

C. Izvedba uzemljivača i vodova za uzemljenje

Izvedba pločastih uzemljivača više se praktički ne upotrebljava, jer se isti rezultat može postići sa cijevnim i trakastim uzemljivačima, a uz manji potrošak metala.

Cijevni uzemljivači izvode se od pocinčanih cijevi 1″ do 2″, od pocinčanog okruglog željeza (štapni uzemljivači) promjera 1″, a u novije vrijeme i od pocinčanih šipki križnog presjeka, što olakšava zabijanje. Otpor uzemljenja izvedenog šipkama križnog presjeka za oko 7% je veći od otpora uzemljenja cijevima istog vanjskog promjera, zbog međusobnog djelovanja izdanaka štapova križnog profila. Duljina cijevnih i štapnih uzemljivača ovisi u prvom redu o mogućnosti zabijanja, dakle o svojstvima zemljišta. Da se taj utjecaj smanji, izvode se posebne konstrukcije uzemljivača koji se sastavljaju nakon zabijanja dijela uzemljivača.

Trakasti uzemljivači prave se od pocinčanih željeznih traka presjeka od 100 mm², a najmanje debljine od 3 mm. Postavljaju se u dubini od oko 1 m (ispod dubine smrzavanja i sušenja), da bi se smanjili troškovi.

Postavljanje uzemljivača od užeta ne preporučuje se, jer je tada površina izložena agresivnom utjecaju zemljišta znatno veća.

Uzemljivači od bakra stavljaju se tamo gdje su velike struje zemnog spoja, zbog mogućnosti većeg opterećenja, a aluminijski tamo gdje se zbog agresivnosti tla drugi materijali ne mogu upotrijebiti.

Vodovi za uzemljenje i sabirni vodovi izvode se od pocinčanog željeza (najmanji presjek 50 mm²), bakra (najmanji presjek 16 mm²) i aluminija (najmanji presjek 35 mm²). Presjek vodova za uzemljenje treba odabrati prema struji koja se može pojaviti u slučaju kvara.

Veličina struje zemnog spoja u mrežama s izoliranom nul-tačkom ovisi o duljini galvanski spojenih vodova ili kabela sa sabirnicama transformatorske stanice. Veličina struje po km zračnog voda može se približno odrediti iz slijedećih formula

jednostruki vod bez zemnog užeta $\quad I_Z = \frac{U\,l}{450}$ A

jednostruki vod sa zemnim užetom $I_Z = \frac{U\,l}{350}$ A

dvostruki vod sa zemnim užetom $I_Z = \frac{U\,l}{400}$ A

gdje su U linijski napon u kV, a l duljina voda u km. Podaci o struji zemnog spoja za kabele navedeni su u tabl. 7.2, 7.3. i 7.4. Sabirni vod uzemljenja dimenzionira se zbog sigurnosti na dvostruku struju zemnog spoja, dok je za ostale vodove mjerodavna struja zemnog spoja.

U mrežama s neposredno uzemljenom nul-tačkom presjek vodova uzemljenja treba odabrati prema struji jednopolnog kratkog spoja.

TABLICA 7.2.

Struje zemnog spoja za normalni kabel u A/km

Presjek mm²	Nazivni napon			
	6 kV	10 kV	15 kV	20 kV
3 × 10	0,40	0,62	—	—
3 × 16	0,45	0,73	0,87	—
3 × 25	0,60	0,78	0,95	1,20
3 × 35	0,65	0,98	1,03	1,31
3 × 50	0,71	1,12	1,22	1,42
3 × 70	0,78	1,20	1,36	1,67
3 × 95	0,87	1,30	1,50	1,81
3 × 120	0,96	1,41	1,60	1,96
3 × 150	1,06	1,50	1,77	2,10
3 × 185	1,20	1,61	1,90	2,25
3 × 240	1,33	1,78	2,10	2,50
3 × 300	1,49	1,94	—	—

TABLICA 7.3.

Struje zemnog spoja za H-kabel u A/km

Presjek mm²	Napon		
	15 kV	20 kV	30 kV
3 × 16	1,63	—	—
3 × 25	1,88	2,18	—
3 × 35	2,08	2,45	3,10
3 × 50	2,40	2,83	3,60
3 × 70	2,77	3,27	4,00
3 × 95	2,97	3,50	4,23
3 × 120	3,27	3,80	4,65
3 × 150	3,54	4,10	5,00
3 × 185	3,87	4,50	5,40
3 × 240	4,32	4,95	5,94
3 × 300	4,70	5,55	6,54

TABLICA 7.4.

Struje zemnog spoja za jednožilni uljni kabel u A/km

Presjek mm²	Napon			
	45 kV	60 kV	110 kV	220 kV
50	7,20	—	—	—
70	8,46	9,00	—	—
95	9,06	9,45	13,20	—
120	9,54	10,59	14,40	—
150	10,05	11,10	15,00	—
185	10,50	11,70	15,60	24,00
240	11,40	12,54	16,80	24,00
300	12,24	13,38	18,00	24,00
400	13,50	14,70	19,50	24,60
500	—	—	20,70	26,40

TABLICA 7.5.

Dopuštene struje opterećenja za vodove uzemljenja

Presjek mm²	Trajno dopuštena struja u A			Dopuštena struja kroz 1 s u kA		
	Fe	Al	Cu	Fe	Al	Cu
16	—	—	150	—	—	2,5
25	—	160	200	—	2,5	4,0
35	—	200	250	—	3,5	5,5
50	100	250	350	3,0	5,0	8,0
70	175	—	—	4,5	7,0	11,5
100	200	—	—	6,0	10,0	16,0
200	300	—	—	12,5	20,0	32,5

U tab. 7.5. navedene su dopuštene struje za pojedine presjeke. Navedeni su podaci o trajno dopuštenim strujama (za mreže s izoliranom nul-tačkom i za mreže s uzemljenjem preko prigušnice) i o dopuštenim strujama za vrijeme 1 sekunde (za mreže s direktno uzemljenom nul-tačkom). Određivanje dopuštene struje za druga vremena trajanja vrši se na isti način kao za sabirnice i strujne transformatore.

Pri izvedbi zaštitnog uzemljenja treba voditi računa o slijedećem:

Uzemljiti sve metalne dijelove koji u normalnom pogonu nisu pod naponom, a mogu pod njega doći u slučaju kvara bilo radi direktnog dodira, bilo radi preskoka luka.

Ručna kola i slične uređaje za upravljanje ne treba posebno uzemljivati, ako su s uzemljenim aparatom galvanski vezani. Ako pak kao veza između ručnog kola i aparata služi lanac, uže, osovina ili sl., što može doći u dodir s električnim lukom, potrebno je i ručno kolo i slične uređaje uzemljiti.

Treba uzemljiti jednu od sekundarnih stezaljki strujnih transformatora. Uobičajeno je da se uzemljuje stezaljka na strani štićenog dijela postrojenja, odnosno na strani dijela postrojenja za koje strujni transformator vrši mjerenje.

Treba uzemljiti jednu od sekundarnih stezaljki dvopolno izoliranih naponskih transformatora. Treba voditi računa o tome, da u rasklopnom postrojenju budu na svim naponskim transformatorima uzemljene stezaljke koje odgovaraju istoj fazi, jer bi inače moglo doći do dvostrukog zemnog spoja. U slogu jednopolno izoliranih naponskih transformatora dovoljno je uzemljiti nul-tačku, ako naponski transformatori ne služe sinhronizaciji. Ako se međutim preko naponskih transformatora vrši kontrola sinhronizma, uzemljuje se jedna faza na niskonaponskoj strani, ali na svim slogovima naponskih transformatora ista faza.

Za uzemljenje aparata koji su smješteni na željeznoj konstrukciji ili željeznim stalcima može se upotrijebiti sama željezna konstrukcija ili stalak, ali samo onda ako su spojevi na konstrukciji zavareni ili tako spojeni vijcima, da postoji dobra i sigurna galvanska veza.

Armatura u željezno-betonskoj konstrukciji može poslužiti kao vod za uzemljenje, ako armatura ima dovoljan presjek, te ako je zavarivanjem ili vijcima osigurana dobra galvanska veza.

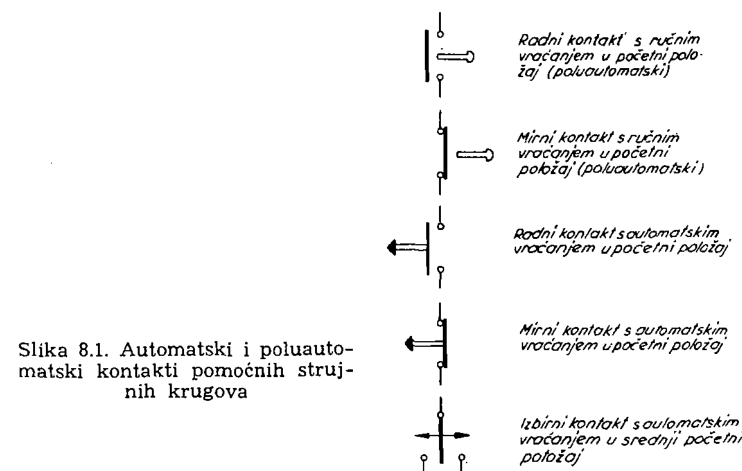
Dijelovi koje treba uzemljiti moraju biti spojeni s uzemljivačem neposredno ili preko sabirnog voda. Ne smiju se, međutim, dijelovi koje treba uzemljiti spajati u seriju.

OSMO POGLAVLJE

POMOĆNI STRUJNI KRUGOVI I POMOĆNI UREĐAJI

8.1. KONTAKTI I POMOĆNI RELEJI

Osim glavnih strujnih krugova, onih za mjerenje i zaštitu, u rasklopnim postrojenjima postoji niz pomoćnih strujnih krugova, koji služe za upravljanje, signalizaciju i blokiranje. Da bi rasklopno postrojenje ispravno funkcioniralo u pogledu zaštite i upravljanja, od velike su važnosti dobro projektirani, izvedeni i uzdržavani pomoćni strujni krugovi.



Slika 8.1. Automatski i poluautomatski kontakti pomoćnih strujnih krugova

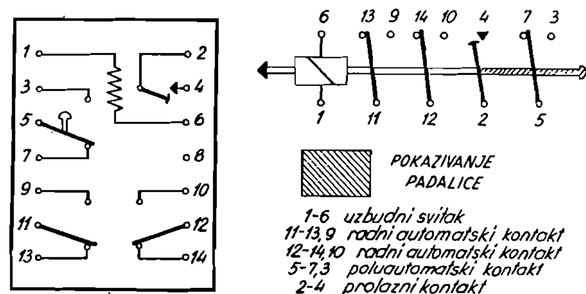
Uz pomoćne strujne krugove izvode se i posebne izvedbe kontakata, čiji su simboli prikazani na sl. 8.1. Tu spadaju kontakti s ručnim i automatskim vraćanjem u početni položaj, te izbirni kontakti s automatskim vraćanjem u srednji položaj. Pod poluautomatskim kontaktima razumijevamo one koji se ručno vraćaju u početni položaj.

Za posredovanje pri prijenosu impulsa zaštitnih releja na uređaje za upravljanje i signalizaciju upotrebljavaju se pomoćni releji, jer kontakti zaštitnih releja (radi potrebne osjetljivosti) nisu tako izvedeni da bi mogli

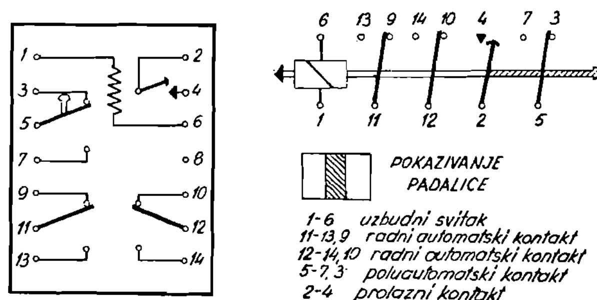
izdržati potrebne struje (npr. za isklapanje i uklapanje sklopke), niti imaju (zbog istog razloga) dovoljno kontakata da bi mogli izvršiti potreban broj radnji. Prema tome, pomoćnim relejem povećava se uklopna (odnosno isklopna) snaga zaštitnog releja, uz istovremeno povećanje broja pomoćnih strujnih krugova na koje treba da djeluje zaštitni relej.

Ako je potrebno izvodi se pomoćni relej s optičkom signalizacijom, da bi se moglo ustanoviti koji je od njih djelovao.

Radi ilustracije prikažimo jednu od izvedaba pomoćnih releja koji ima padalicu (kao optički signal), jedan poluautomatski, dva automatska i jedan prolazni kontakt (sl. 8.2). Padalica ima na prednjoj strani tri različito označena polja, od kojih je samo jedno vidljivo kroz otvor na kućištu releja. Padalica je spojena s kotvom releja, pa kad svitak releja nije uzbuđen, kroz otvor na kućištu releja vidi se crno polje (sl. 8.2). Treba



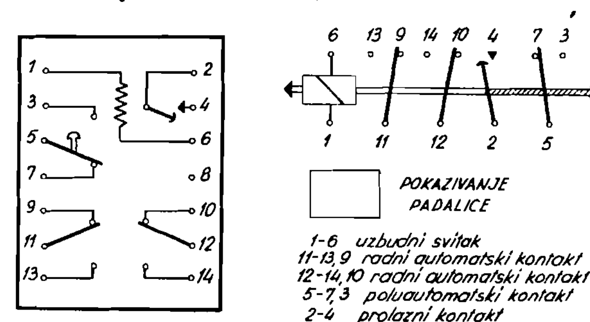
Slika 8.2. Shema spoja (prikazana na dva načina) i pokazivanje padalice pomoćnog releja — normalni položaj (neuzbuđeni svitak)



Slika 8.3. Shema spoja (prikazana na dva načina) i pokazivanje padalice pomoćnog releja — položaj neposredno nakon djelovanja

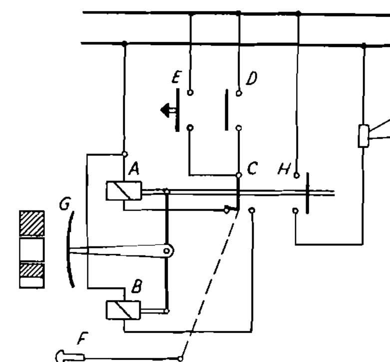
napomenuti da je crno obojeno i kućište releja, pa se polje padalice ne opaža. Kad se svitak uzbudi i privuče kotvu, padalica se postavi tako da se kroz otvor na kućištu vidi bijelo polje s crvenom crtom u sredini (sl. 8.3). U tom položaju ostaje padalica sve dok se pritiskom na dugme ne potvrdi (kvitira) relej. Potvrdom releja padalica se postavlja tako da će se na otvoru pojaviti bijelo polje, što znači da je svitak još uzbuđen.

Ako je u međuvremenu — između uzbude svitka i potvrđivanja — prekinut dovod struje uzbudnom svitku, padalica će se potvrđivanjem (kvitiranjem) postaviti tako da će se na otvoru pojaviti crno polje, kao u početnom položaju. To će se dogoditi i kad nakon potvrđivanja dođe do prekida dovoda struje uzbudnom svitku.



Slika 8.4. Shema spoja (prikazana na dva načina) i pokazivanje padalice pomoćnog releja — položaj nakon potvrde (kvitiranja)

Poluautomatski kontakt vezan je s dijelom koji se pomiče nakon uzbude svitka, a vraća se u početni položaj kvitiranjem. Potvrđivanjem se dakle prekida strujni krug (zatvoren preko kontakata 5 i 3), koji je nakon uzbude svitka zatvorio poluautomatski kontakt. Takvi kontakti koriste se za one strujne krugove koje želimo imati uključene od trenutka djelovanja releja do potvrde releja npr. za akustičku ili optičku signalizaciju njegova djelovanja.



Slika 8.5. Shema releja s padalicom (signalni relej)

Automatski kontakti zatvaraju se pomakom kotve i ostaju zatvoreni sve do prekida struje kroz uzbudni svitak. Mogu se upotrijebiti npr. za isklapanje sklopke.

Prolaznim kontaktom kratkotrajno se zatvara strujni krug pomakom kotve, a vraća se u početni položaj potvrdom releja. Kratkotrajno zatva-

ranje strujnog kruga dovoljno je da bi proradio neki drugi relej. Takav se kontakt normalno upotrebljava za akustičku signalizaciju (truba).

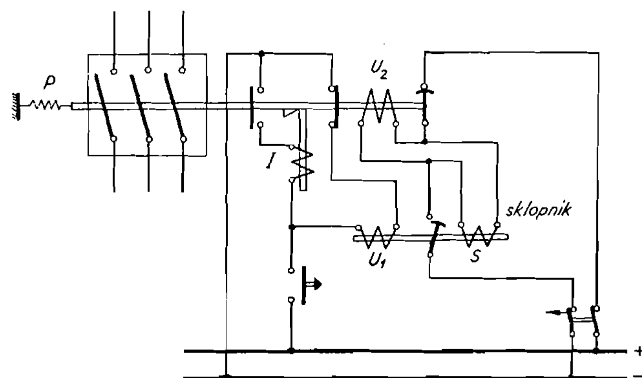
Naravno da se pomoćni releji izvode i bez signalizacije djelovanja i s raznim brojem i raznim vrstama kontakata.

Osim u kombinaciji s pomoćnim relejem, izvodi se posebno relej s padalicom (signalni relej). Jedna od takvih izvedaba prikazana je na sl. 8.5. Padalica G ima tri polja: crveno, bijelo i crveno-bijelo. Na otvoru releja, kad on nije uzbuđen, vidi se bijelo polje. Kad zaštitni relej proradi i zatvori kontakt D, uzbudit će se svitak A koji će povući polugu padalice i zatvoriti kontakte trube H. Na otvoru releja pokazat će se crveno polje. Signal trube upozorit će osoblje da je došlo do neke promjene, a crvenim poljem bit će označeno mjesto te promjene. Pritiskom na dugme F pomaknut će se kontakt C na desno, što će prekinuti strujni krug svitka A, a zatvoriti strujni krug svitka B, koji će sada privući polugu padalice, pa će se na otvoru pokazati crveno-bijelo polje. Takvo stanje ostat će sve dok je zatvoren kontakt D. Otvaranjem kontakta D vraćaju se padalica i kontakt C u početni položaj. Kontakt E služi za kontrolno ispitivanje spremnosti releja za djelovanje.

8.2. POMOĆNI STRUJNI KRUGOVI SKLOPKE

A. Pogon za upravljanje

Sklopka po svojoj funkciji mora imati uređaj za automatsko isklapanje. Impuls za djelovanje tog uređaja daje se mehanički ili električki, ali se isklapanje vrši energijom akumuliranom u peru (za vrijeme uklapanja) ili u komprimiranom zraku. Akumuliranje energije za isklapanje neophodno je potrebno da se osigura isklapanje sklopke u svakom slučaju. U slučaju nužde može se i ručno dati impuls za isklapanje sklopke, ako je već ranije akumulirana energija za isklapanje.

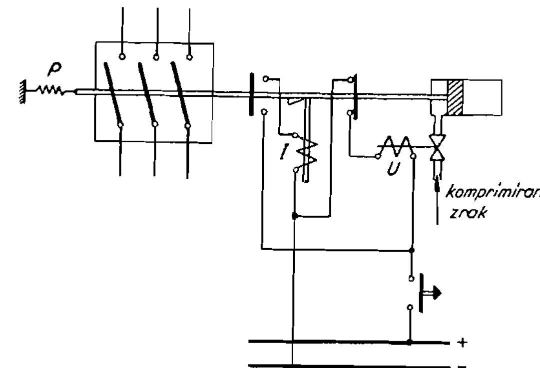


Slika 8.6. Shema spoja upravljanja sklopke magnetskim pogonom

Mehanički impuls za isklapanje daje primarni relej, dok u slučaju upotrebe sekundarnih releja uvijek imamo električni impuls. Prema tome tada se može sklopka isklopiti i iz daljine, za što je dovoljno zatvoriti strujni krug za isklapanje.

Nasuprot tome uklapanje se može vršiti i samo ručno. Takav način pogona, međutim, dolazi u obzir samo za manje sklopke, jer za veće je potrebna znatna snaga za uklapanje i natezanje pera. Zbog toga se u velikoj većini slučajeva uklapanje vrši magnetskim, pneumatskim ili motornim pogonom.

Uklapanje magnetom ne vrši se neposredno tipkalom (radni kontakt s automatskim vraćanjem u početni položaj), nego preko sklopnika (sl. 8.6) koji uključuje i isključuje svitak za uklapanje. Upotreba sklopnika neophodna je, jer je za uklapanje magnetom potrebna velika struja, pa bi bez sklopnika kontakti tipkala bili preopterećeni. Na sl. 8.6. prikazano je stanje pri isklopljenoj sklopci. Pritiskom na tipkalo uzbuđuje se svitak U_1 sklopnika, koji zatvara kontakt sklopnika preko kojega se zatvaraju strujni krugovi za magnetski pogon sklopke (U_2) i svitak S. Nakon uklapanja sklopke svitak S vraća sklopnik u početni položaj. Istodobno s uklapanjem sklopke svitak U_2 nateže pero (P), pa je sklopka odmah spremna



Slika 8.7. Shema spoja upravljanja sklopke komprimiranim zrakom (samo uklapanje, isklapanje perom)

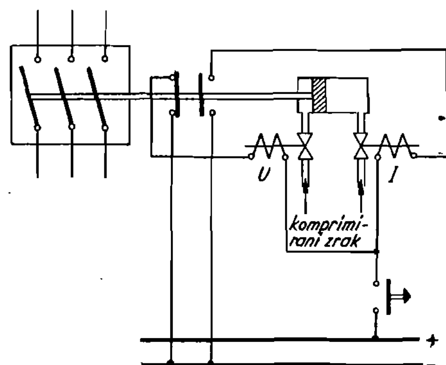
za isklapanje. Dovoljno je uzbuditi svitak I pritiskom na isto tipkalo, da bi se oslobodio zapor koji ne dopušta otvaranje sklopke.

Na sl. 8.7. ulogu svitka U_2 preuzima cilindar sa stapom za pogon s komprimiranim zrakom, pomoću kojega se vrši uklapanje, s istodobnim natezanjem pera. Isklapanje vrši pero nakon oslobođenja zapora. Svitak za uklapanje (U) otvara ventil za dovod komprimiranog zraka u cilindar.

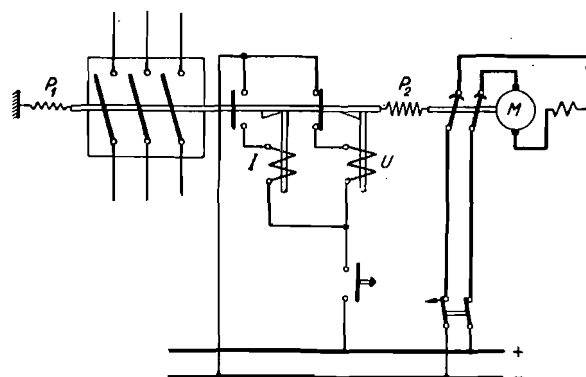
I za uklapanje i za isklapanje može se upotrijebiti komprimirani zrak (sl. 8.8), pa tada nije potrebno pero za isklapanje, jer je u komprimiranom zraku akumulirana potrebna energija.

Upotreba motornog pogona treba dva pera: za uklapanje (P_2) i za isklapanje (P_1). Na sl. 8.9. prikazan je takav pogon neposredno nakon isklapanja sklopke, kad se preko kontakata mehanički vezanih s osovinom motora uključuje istosmjerni motor, koji nateže pero P_2. Kad je pero P_2

nategnuto prekida se dovod struje motoru i pero je spremno za uklapanje, koje se vrši oslobađanjem zapora pomoću svitka U. Uklapanje se dakle vrši akumuliranom energijom pera P_2, koje istodobno nateže pero P_1 za isklapanje. Motor je priključen na bateriju preko zaštitne sklopke. Takav način pogona moguće je izvesti i za ručni pogon. Tada se ručno, preko pogodno izvedenog prijenosa, navija pero za uklapanje (P_2), što svakako znatno dulje traje nego uz upotrebu motora.



Slika 8.8. Shema spoja upravljanja sklopke komprimiranim zrakom

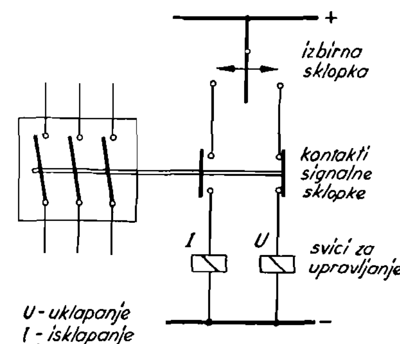


Slika 8.9. Shema spoja upravljanja sklopke motornim pogonom

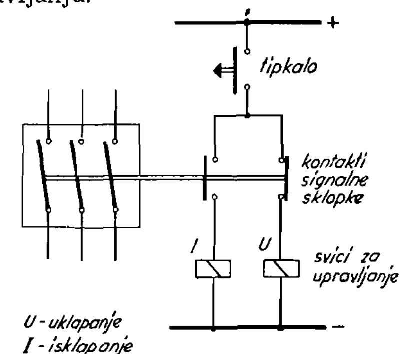
Koji će se od pogona upotrijebiti ovisi u prvom redu o tome da li će se u rasklopno postrojenje postaviti pneumatske sklopke ili neki drugi tip sklopaka. Ako se postave pneumatske sklopke, najpovoljnije je izvesti pogon s komprimiranim zrakom, jer su za gašenje luka potrebni kompresorski uređaj i razvod zraka. Ako se postavljaju sklopke ostalih izvedaba, treba detaljnije proučiti pitanje izbora pogona sklopaka i rastavljača, pa se odlučiti za jedan od opisanih načina pogona. Treba spomenuti da magnetski pogon dolazi u obzir najčešće za manje sklopke i manja rasklopna postrojenja.

B. Sheme spoja upravljanja

Kao uređaj za upravljanje može poslužiti sklopka s izbirnim kontaktom (sl. 8.10), tipkalo (sl. 8.11) i komandno-potvrdna sklopka, koja će biti opisana u poglavlju o povratnom javljanju.



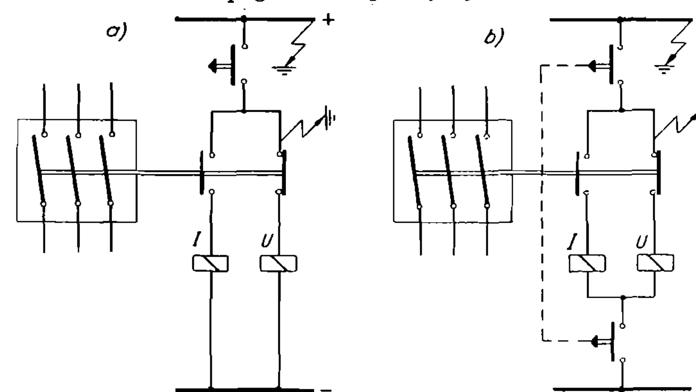
Slika 8.10. Strujna shema upravljanja sklopkom pomoću izbirne sklopke



Slika 8.11. Strujna shema upravljanja sklopkom pomoću tipkala

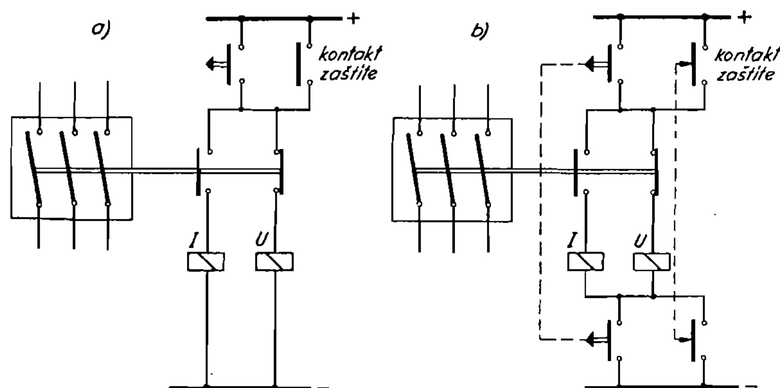
U svim slučajevima strujni krugovi svitaka za upravljanje spojeni su preko kontakata na signalnoj sklopki, koja je mehanički povezana s osovinom sklopke. Spajanje preko kontakata signalne sklopke onemogućuje uključivanje svitka za uklapanje kad je sklopka uklopljena (sl. 8.10). Osim toga spajanjem preko kontakata signalne sklopke omogućeno je (sl. 8.11) da se istom operacijom (pritiskom na tipkalo) izvrši i uklapanje i isklapanje.

Sheme na sl. 8.10. i 8.11. zapravo su strujne sheme spoja pogona za upravljanje, te one na pojednostavnjen način prikazuju sheme djelovanja, bez obzira o kakvom se pogonu za upravljanje radi.



Slika 8.12. Jednopolno (a) i dvopolno (b) prekidanje strujnih krugova za upravljanje

Da se izbjegne opasnost krivog djelovanja zbog premoštenja kontakata tipkala, upotrebljava se dvostruko prekidanje strujnih krugova (sl. 8.12b). Normalno se uzemljuje jedan pol akumulatorske baterije, pa će u slučaju zemnog spoja kao na sl. 8.12a doći do uklapanja (ako je sklopka isklopljena), odnosno do isklapanja sklopke (ako je uklopljenja) i bez pritiska na tipkalo. Dvostrukim prekidanjem strujnih krugova — izvedenim kao na sl. 8.12b — do pogrešnog djelovanja neće dolaziti ni u slučaju zemnog spoja na instalaciji. Treba naglasiti da su kontakti tipkala međusobno mehanički spojeni (na što ukazuje crtkana linija koja spaja tipkala).



Slika 8.13. Jednopolno (a) i dvopolno (b) prekidanje strujnih krugova za upravljanje s tipkalom i kontaktima zaštite

Isti svici za upravljanje služe za pogon sklopke i u slučaju djelovanja zaštite. Zbog toga se paralelno s tipkalom (ili izbirnim kontaktom) spajaju i kontakti zaštitnog releja, odnosno kontakti pomoćnog releja, ako zaštita ne djeluje neposredno na pogon za upravljanje. Na sl. 8.13. prikazana je strujna shema spoja upravljanja sklopkom s jednostrukim i dvostrukim prekidanjem strujnih krugova.

C. Sheme spoja povratnog javljanja

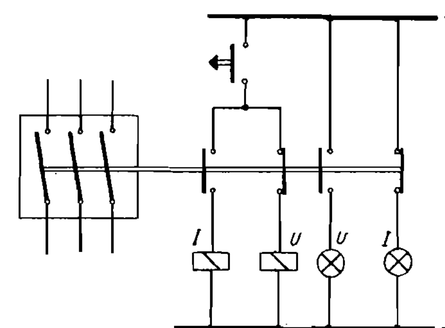
Zadatak povratnog javljanja jest da signalizira položaj sklopke. Ta signalizacija mora biti tako izvedena da se položaj sklopke može nedvosmisleno utvrditi. Zbog toga se kao kontakti za povratno javljanje upotrebljavaju kontakti signalne sklopke, koja je mehanički spojena s osovinom sklopke. Osim toga se smatra da nije dovoljno pouzdana signalizacija koja se može ostvariti prekidom strujnog kruga za povratno javljanje, jer do prekida strujnog kruga može doći i zbog kvara. Ne može se npr. smatrati pouzdanim povratnim javljanjem ono pri kojem bi upaljena žarulja označavala da je sklopka uključena, a ugašena da je isključena, jer bismo u slučaju izgaranja žarulje mogli biti krivo informirani.

Obično se upotrebljavaju slijedeći načini povratnog javljanja:

a) Pomoću dvije žarulje (sl. 8.14), od kojih jedna (obično crvena) svijetli kad je sklopka uključena, a druga (obično zelena) kad je isključena. Ukoliko ne gori nijedna od žarulja, znak je da je barem jedna pregorjela. Ovaj način nalazimo samo u starijim postrojenjima.

b) Pomoću pokazivača položaja (sl. 8.15). Takav pokazivač se sastoji od metalne okrugle pločice i dva elektromagneta, koji su međusobno okomito postavljeni. Obojena linija na pločici postavi se okomito (ako je sklopka uključena) ili horizontalno (ako je isključena). Ukoliko nestane napona u strujnom krugu elektromagneta, djelovanjem pera pločica će se postaviti tako da obojena linija zatvara kut od oko 45° s horizontalom.

c) Sa komandno-potvrdnom sklopkom. U tu svrhu upotrebljavaju se sklopke posebne konstrukcije, koje nazivamo komandno-potvrdnim sklopkama, jer služe ne samo za povratno javljanje (potvrđivanje izvršene komande), već i za upravljanje.

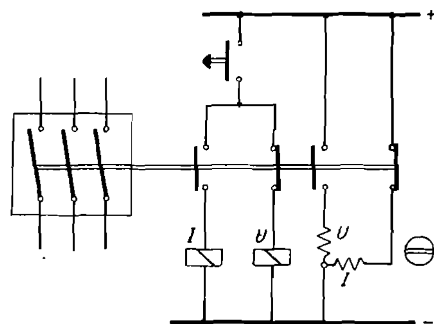


Slika 8.14. Shema spoja povratnog javljanja pomoću dvije žarulje (nacrtani su i strujni krugovi upravljanja)

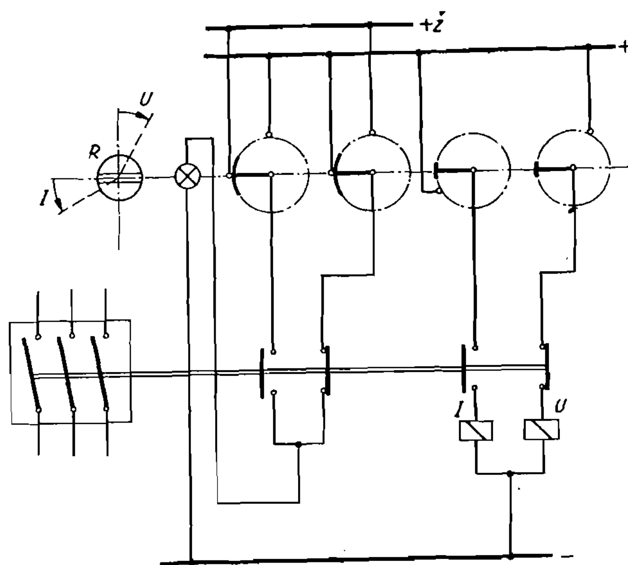
Jedna od takvih izvedaba jest komandno-potvrdna sklopka sa žmirkavim svjetlom (sl. 8.16). Kontakti su mehanički spojeni na osovinu komandno-potvrdne sklopke. Osovina se zakreće pomoću ručice u kojoj je smještena žarulja, a koja može biti priključena na konstantan napon (+) ili na promjenljiv napon (žmirkavo svjetlo + Ž). Na ručici se nalazi otvor kroz koji se vidi svjetlo žarulje. Na sl. 8.16. prikazano je stanje nakon isklapanja sklopke, čemu odgovara i položaj ručice (R), a signalna žarulja svijetli konstantnim intenzitetom. Ako se želi uklopiti sklopku potrebno je ručicu, kojom se zakreće i osovina komandno-potvrdne sklopke, zakrenuti za 90° (sl. 8.17a, položaj 2). Tim se zakretanjem položaj učinske sklopke nije promijenio, ali je signalna žarulja priključena na promjenljiv napon, što uvijek znači da položaj komandno-potvrdne sklopke ne odgovara položaju učinske sklopke. Da bi se uklopila učinska sklopka potrebno je još dalje zakrenuti ručicu (sl. 8.17a, položaj 3), da bi se zatvorio strujni krug svitka za uklapanje. Učinska sklopka će se zatvoriti, kontakti će se signalne sklopke, vezane uz njezinu osovinu, pomaknuti, pa će žarulja zasvijetliti konstantnim intenzitetom (položaj 4), što će biti znak da je uklapanje izvršeno. Ispuštanjem ručice ona će se postaviti

u okomit položaj (položaj 5), žarulja će gorjeti konstantnim intenzitetom, jer položaj ručice odgovara položaju učinske sklopke. Isklapanje se vrši analognim zahvatima, što je prikazano na sl. 8.17b.

Izvode se i komandno-potvrdne sklopke u tamnom spoju (sl. 8.18) u kojih upaljena žarulja znači da položaj ručice na komandno-potvrdnoj sklopki ne odgovara položaju učinske sklopke. Ugašena žarulja, nasuprot tome pokazuje poklapanje položaja ručice i učinske sklopke. Da se donekle izbjegne nesporazum do kojega bi moglo doći u slučaju izgaranja signalne žarulje u kućištu komadno-potvrdne sklopke, postavljaju se po dvije

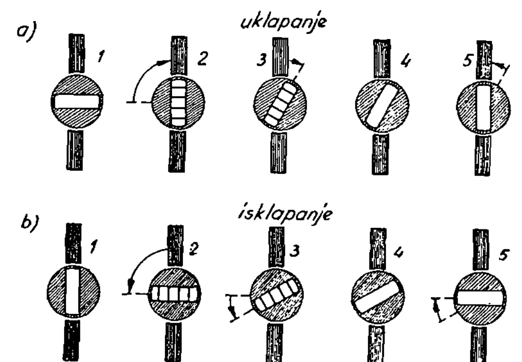


Slika 8.15. Shema spoja povratnog javljanja pomoću pokazivača položaja (nacrtani su i strujni krugovi upravljanja)

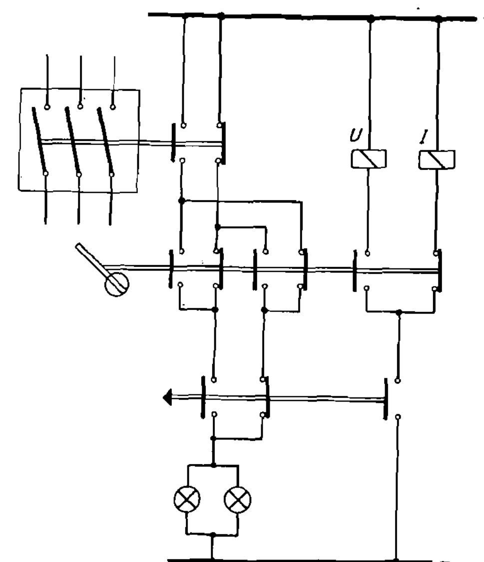


Slika 8.16. Shema spoja povratnog javljanja i upravljanja pomoću komandno-potvrdne sklopke sa žmirkavim svijetlom

paralelno spojene žarulje. U istom kućištu smještena je osovina spojena s ručicom i osovina spojena s tipkalom (na sl. 8.18. te dvije osovine prikazane su odvojeno), pa su za promjenu položaja učinske sklopke potrebne

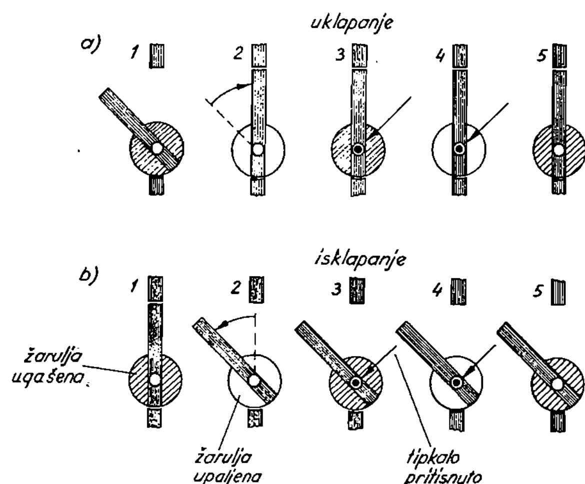


Slika 8.17. Položaji ručice prilikom uklapanja (a) i isklapanja (b) komandno-potvrdne sklopke sa žmirkavim svijetlom



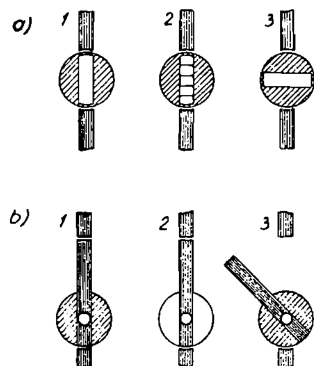
Slika 8.18. Shema povratnog javljanja i upravljanja pomoću komandno-potvrdne sklopke u tamnom spoju

dvije operacije: zakretanje ručice i pritisak na tipkalo. Shema spoja na sl. 8.18. prikazuje stanje kad je učinska sklopka isklopljena, te kad se ručica nalazi u položaju »isklopljeno«. To stanje odgovara i sl. 8.19a —



Slika 8.19. Položaj ručice komandno-potvrdne sklopke u tamnom spoju prilikom uklapanja (a) i isklapanja (b)

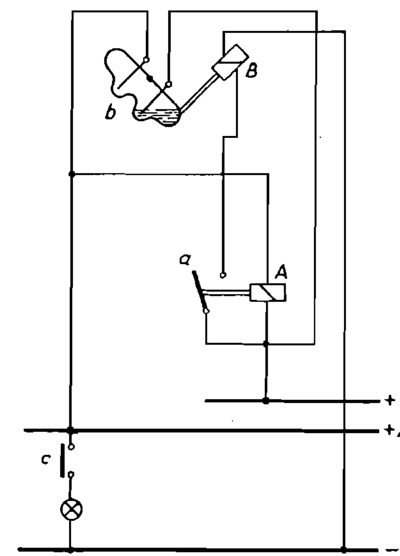
položaju 1. Da bi se uklopila učinska sklopka potrebno je zakrenuti ručicu komandno-potvrdne sklopke (položaj 2 na sl. 8.19a), pa će se upaliti žarulje, jer položaj ručice ne odgovara položaju sklopke. Tada su međutim zatvoreni kontakti kruga za uklapanje na osovini spojenoj s ručicom, pa je potrebno samo pritisnuti tipkalo (položaj 3) da i cijeli strujni krug svitka za uklapanje bude zatvoren. Pritiskom na tipkalo gasi se signalna žarulja, da bi se ponovo upalila kad se zatvore kontakti učinske sklopke (položaj 4). Otpuštanjem tipkala konačno se signalna žarulja gasi (položaj 5). Analogno se postupa pri isklapanju (sl. 8.19b).



Slika 8.20. Položaj ručice i signalizacije nakon automatskog isklapanja učinske sklopke za dvije izvedbe komandno-potvrdnih sklopaka

Ako dođe do automatskog isklapanja sklopke djelovanjem zaštite, komadno-potvrdna sklopka registrirat će tu promjenu žmirkavim svjetlom (sl. 8.20a), odnosno paljenjem žarulja (sl. 8.20b).

Da se postigne intermitirajuće svjetlo na signalnoj žarulji u komandnopotvrdnoj sklopki sa žmirkavim svjetlom, potrebno je postaviti poseban relej za žmirkavo svjetlo. Jedna od izvedaba prikazana je na sl. 8.21. Treba međutim napomenuti da postoji niz izvedaba takvog releja.

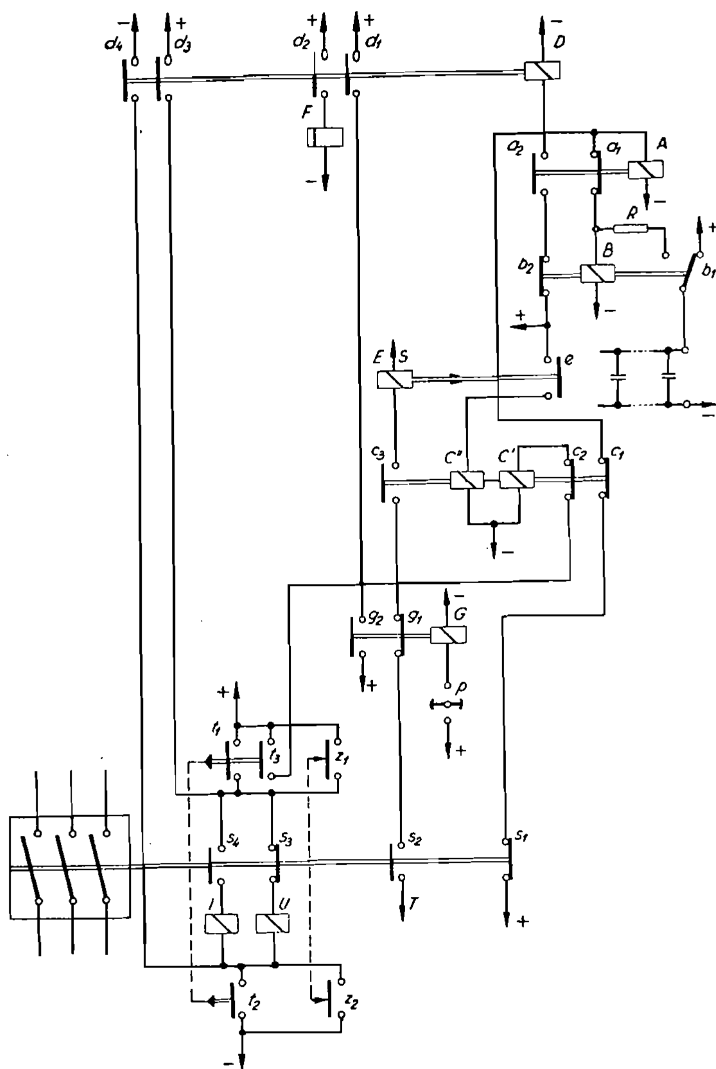


Slika 8.21. Shema spoja releja za žmirkavo svijetlo

Zatvaranjem kontakta c releja za žmirkavo svjetlo (sl. 8.21) strujni krug žarulje zatvoren je preko svitka releja A, pa žarulja ne dobiva pun napon. Svitak A prebacit će međutim kontakt a, pa će se zatvoriti strujni krug svitka B, koji će privući živin relej u horizontalni položaj, što omogućuje zatvaranje strujnog kruga preko kontakata živinog releja i do uključenja žarulje na pun napon, jer je sabirnica + Ž neposredno spojena sa sabirnicom +. Takvim spajanjem međutim premošten je svitak A, pa se njegovi kontakti vraćaju u početni položaj, a cijeli proces počinje ispočetka.

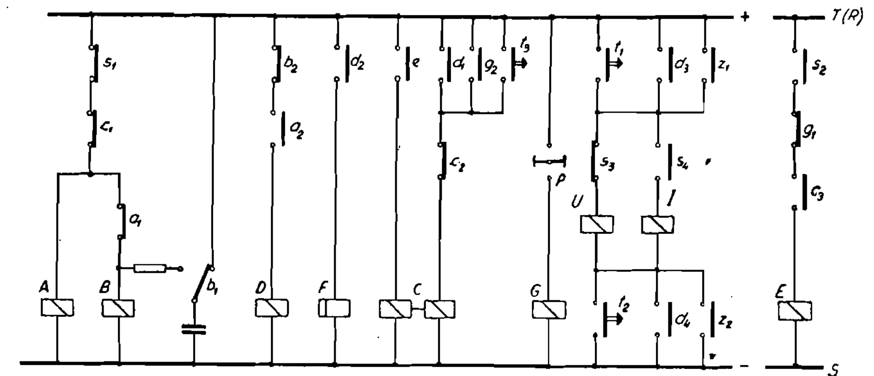
D. Ponovno uklapanje sklopke

Veći dio kratkih spojeva u mrežama pojavljuju se kao prolazni kratki spojevi u obliku električnog luka. Isklapanjem sklopke na strani napajanja luk će se na mjestu kratkog spoja ugasiti, a zrak će se nakon gašenja luka unutar vrlo kratkog vremena (nekoliko desetinki sekunde) deionizirati. Ako se tada ponovno uključi sklopka na strani napajanja, kratki spoj se obično neće više pojaviti. Kratkotrajnu beznaponsku pauzu potrošači neće ni osjetiti, ako ne traje dulje od oko 0,5 sekunda. Kad isključeni vod spaja elektrane, beznaponska stanka nepovoljno utječe na održanje sinhronizma, koji se može najčešće održati tek ako su elek-



Slika 8.22. Shema djelovanja releja za automatsko brzo ponovno tropolno uklapanje sklopke

trane spojene preko više vodova, od kojih je jedan kratkotrajno isklopljen. Povoljniju situaciju s obzirom na održavanje sinhronizma imamo ako se u slučaju jednopolnog kratkog spoja kratkotrajno isklopi samo onaj pol sklopke koji odgovara fazi na kojoj je nastao kratki spoj. Za to su potrebni posebni pogoni za svaki pol sklopke.



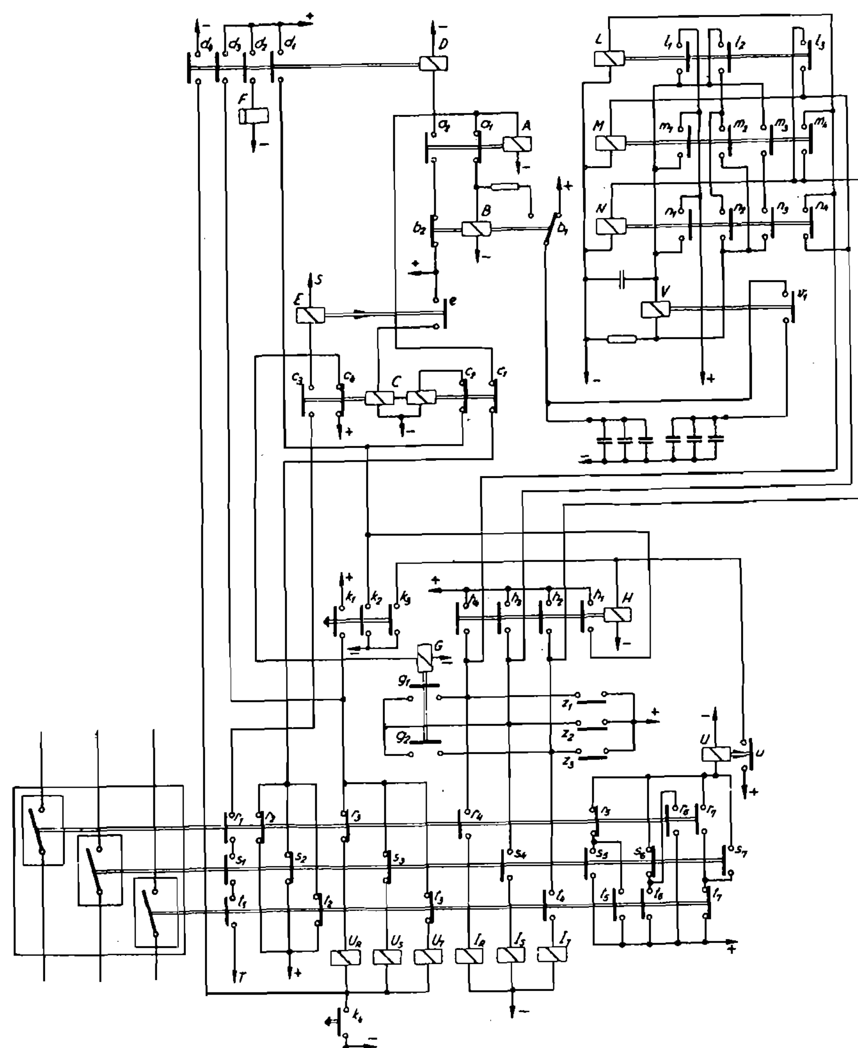
Slika 8.23. Strujna shema releja za automatsko brzo ponovno tropolno uklapanje sklopke

Postavljanje specijalnih releja omogućuje ponovno uklapanje sklopke. Izvode se releji za samo tropolno uklapanje, te releji za jednopolno i tropolno ponovno uklapanje. Opisat ćemo jednu izvedbu takvih releja, da se vidi kakve sve zahtjeve treba da ispuni takav relej.

Na sl. 8.22. prikazana je shema djelovanja, a na sl. 8.23. strujna shema releja za tropolno ponovno uklapanje. Položaj kontakata releja odgovara stanju kad je zbog djelovanja zaštite sklopka isklopila. Preko kontakta s_1 na signalnoj sklopki učinske sklopke uzbuđeni su releji A i B. Relej B brže djeluje nego relej A, pa će se prije otvoriti kontakt b_2 nego što će se zatvoriti kontakt a_2. Djelovanjem releja B preklopit će se osim toga konktakt b_1, pa će se nabijeni kondenzatori izbijati preko otpora R i namota releja, jer će namot releja B biti odvojen od napajanja otvaranjem kontakta a_1. Trajanje izbijanja ovisno je uz zadani otpor R o kapacitetu kondenzatora, pa promjena kapaciteta predstavlja mogućnost udešenja trajanja beznaponske stanke. Kad se naime kondenzatori izbiju prestaje napajanje releja B i zatvara se kontakt b_2, čime se zatvara strujni krug svitka releja D. Zatvaranjem kontakta d_3 i d_4 uzbuđuje se svitak za uklapanje U, što je dovoljno za ponovno uklapanje sklopke. Djelovanjem releja D zatvara se i kontakt d_1, koji zatvara strujni krug releja C'. Relej C ima dva namota, C' i C'', u kojeg je posebnim mehanizmom postignuto da poslije prekida napajanja jednog od namota relej ne mijenja položaj. Zbog djelovanja releja C' otvara se kontakt c_1 čime je prekinut krug napajanja releja A i B, da bi se spriječilo drugo ponovno uklapanje ako bi sklopka ponovno isklopila, što bi značilo da kratki spoj nije eliminiran i pored kratkotrajnog prekida napajanja. Da bi se relej za ponovno uklapanje pripremio za slijedeće djelovanje, vremenski relej E priključen je na sekundarne namote naponskih transformatora, pa se nakon ponovnog uklapanja uzbuđuje namot tog releja preko zatvorenih kontakata s_2 i c_3 (c_3 je zatvoren djelovanjem releja C'). Nakon udešenog vremena (u ovisnosti o vremenu djelovanja zaštite, jer djelovanje releja E treba da bude dulje od vremena djelovanja zaštite) zatvorit će se kontakt e. To će uzbuditi relej C'', koji će kontakte c_1, c_2 i c_3 vratiti u početni položaj, te će relej biti spreman za ponovno uklapanje, ako bi tada došlo do ispada sklopke.

Prema tome, ako zaštita nakon ponovnog uklapanja ponovno djeluje sklopka će isklopiti, ali neće doći do drugog ponovnog uklapanja, jer će kontakt c_1 biti otvoren, budući da još nije proradio relej E.

Uređaj za ponovno uklapanje ne smije djelovati nakon ručnog isklapanja sklopke. To osigurava kontakt t_8 na tipkalu (ili na komandno-



Slika 8.24. Shema djelovanja releja za automatsko brzo ponovno jednopolno i tropolno uklapanje

potvrdnoj sklopki) čijim se zatvaranjem uzbuđuje relej C′ i otvara kontakt c_1, što onemogućuje zatvaranje strujnih krugova za relej A i B.

Namjerno blokiranje releja za ponovno uklapanje provodi se preklopkom p, koja zatvara strujni krug releja G. Zatvaranjem kontakta g_2 otvara se kontakt c_1, što onemogućuje ponovno uklapanje. Relej C ne može se vratiti u početni položaj, jer je strujni krug releja E prekinut otvaranjem kontakta g_1.

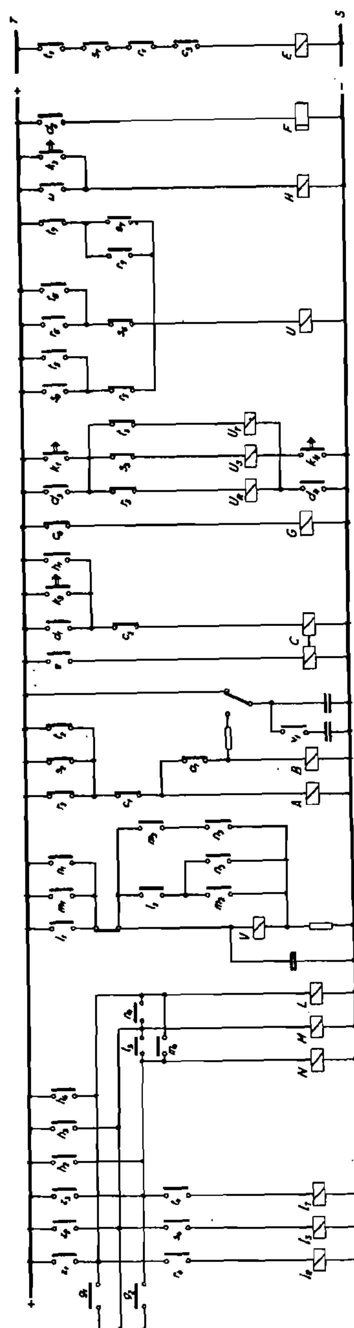
Kontakt d_2, koji se zatvara prilikom svakog ponovnog uklapanja, uzbuđuje elektromagnetski brojač F, koji registrira broj ponovnih uklapanja.

Na sl. 8.24. prikazana je shema djelovanja, a na sl. 8.25. strujna shema releja za automatsko brzo ponovno jednopolno i tropolno uklapanje sklopke. Relej je spojen tako da u slučaju jednopolnog kratkog spoja dolazi do jednopolnog isklapanja i jednopolnog ponovnog uklapanja, a u slučaju dvopolnog i tropolnog kratkog spoja do tropolnog isklapanja i tropolnog ponovnog uklapanja. U oba je slučaja međutim ponovno definitivno isklapanje tropolno. Uređaj prikazan na sl. 8.24. i 8.25. sastoji se od dijela za tropolno ponovno uklapanje, koji je već opisan, i dodatnog dijela za jednopolno ponovno uklapanje. Položaji kontakata signalne sklopke spojene s učinskom sklopkom crtani su za položaj otvorene učinske sklopke.

U slučaju jednopolnog kratkog spoja faze R zatvorit će se kontakt z_1 zaštitnog releja, pa će se preko kontakta r_4 uzbuditi svitak I_R za isklapanje pola R (moramo naravno zamisliti da je tada sklopka uklopljena). Zbog istog razloga uzbudit će se i svitak releja L, zbog čega će se zatvoriti kontakt l_1 i uzbuditi svitak releja V, koji će zatvoriti kontakt v_1. Zatvaranjem kontakta v_1 spajaju se paralelno kondenzatori koji su priključeni na kontakt b_1, pa se postiže dulja beznaponska stanka pri jednopolnom ponovnom isklapanju, jer se otvaranjem pola R učinske sklopke zatvara kontakt r_2 preko kojega se uzbuđuju svici releja A i B, zbog čega dolazi do ponovnog uklapanja na već opisani način. Nakon izvršenog ponovnog uklapanja ne mogu se uzbuditi releji A i B sve dok se ne zatvori kontakt e vremenskog releja E. Kroz sve je to vrijeme svitak releja G bez struje zbog otvorenog kontakta c_4, pa ako dođe do ponovnog djelovanja zaštite isklopit će sva tri pola sklopke, jer će se uzbuditi sva tri svitka za isklapanje (I_R, I_S i I_T) preko zatvorenih kontakata g_1 i g_2 i pored zatvaranja samo jednog kontakta zaštitnog releja (z_1, z_2 ili z_3).

Ako nastupi dvopolni kratki spoj npr. između faza R i S zatvorit će se kontakti z_1 i z_2, te uzbuditi releje L i M. Preko kontakta m_4 bit će tada uzbuđen i svitak I_T, pa će biti isklopljena sva tri pola sklopke, dok će preko kontakata l_1, m_1, l_2, m_3 i m_2 biti premošten relej V, pa će vrijeme ponovnog isklapanja biti kraće, jer će na kontakt b_1 biti priključen samo dio kondenzatora. Ponovno uklapanje izvršit će se tropolno, jer su kontakti r_3, s_3 i t_3 na signalnoj sklopki zatvoreni. Komandu za ponovno uklapanje dat će kontakti r_2, s_2 i t_2.

Ako se nakon jednopolnog ili dvopolnog isklapanja dogodi da uređaj za ponovno uklapanje ne djeluje, potrebno je čim prije isklopiti i ostala dva pola. Da se to osigura, predviđen je vremenski relej U, koji se uzbuđuje preko kombinacije kontakata r_5—r_7, s_5—s_7 i t_5—t_7 za svako jednopolno i dvopolno isklapanje. Nakon udešenog vremena, koje je dulje od vremena za ponovno uklapanje, zatvara se kontakt u i uzbuđuje svitak releja H, koji zatvara kontakte h_1—h_4 čime se daje komanda za isklapanje još preostalih polova učinske sklopke.

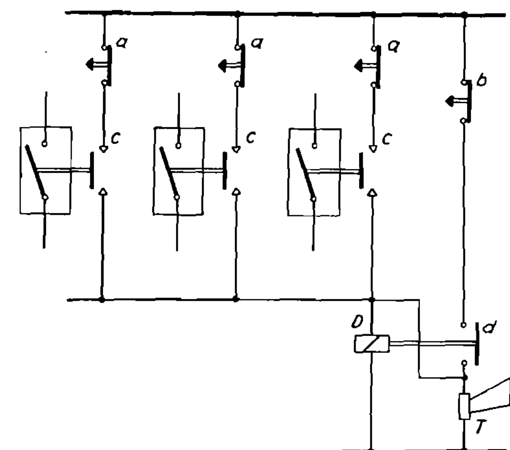


Slika 8.25. Strujna shema releja za automatsko brzo ponovno jednopolno i tropolno uklapanje sklopke

Ručno uklapanje vrši se preko tipkala i kontakata k_1 i k_4 (dvopolno prekidanje), istodobno se zatvara i kontakt k_2, koji blokira relej za ponovno uklapanje. Ručno isklapanje (uvijek tropolno) vrši se preko kontakta k_3, preko kojega se uzbuđuje svitak releja H. Zatvaranjem kontakata h_2, h_3 i h_4 dolazi do djelovanja svitaka za isklapanje, a preko kontakta h_1 blokira se opet relej za ponovno uklapanje.

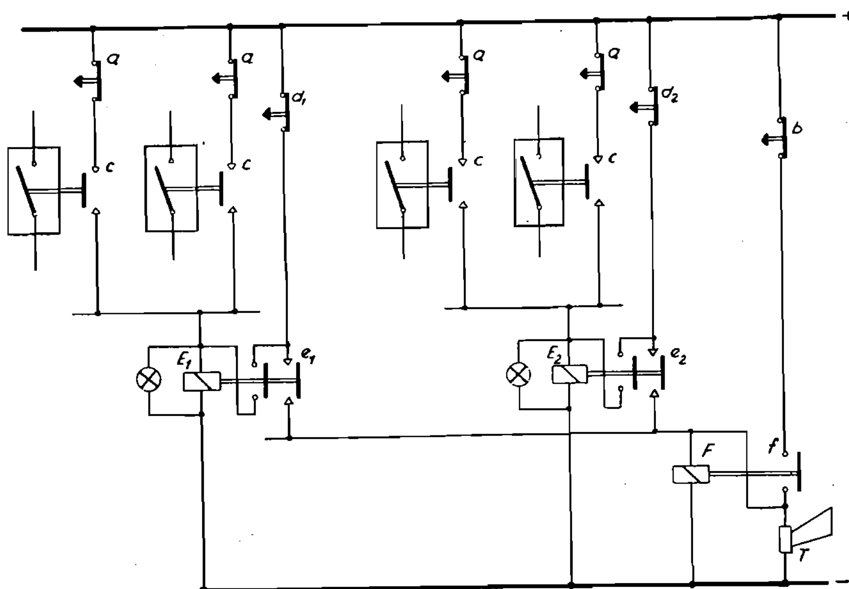
E. Signalizacija isklapanja sklopke

Nadzorno osoblje u rasklopnom postrojenju treba da bude upozoreno kad isklopi sklopka, zbog djelovanja releja. Vizuelni signal (žmirkavo svjetlo, promjena boje žarulje, paljenje svjetla) nije dovoljno upozorenje, jer se može opaziti samo kad se gleda na dio gdje se ta promjena dogodila. Zbog toga se za javljanje isklapanja sklopke upotrebljava i akustička signalizacija (najčešće truba), kojom je osoblje upozoreno da je došlo do promjene, pa se tek pregledom vizuelnih signala može ustanoviti i mjesto nastale promjene.



Slika 8.26. Shema spoja signalizacije ispada sklopke

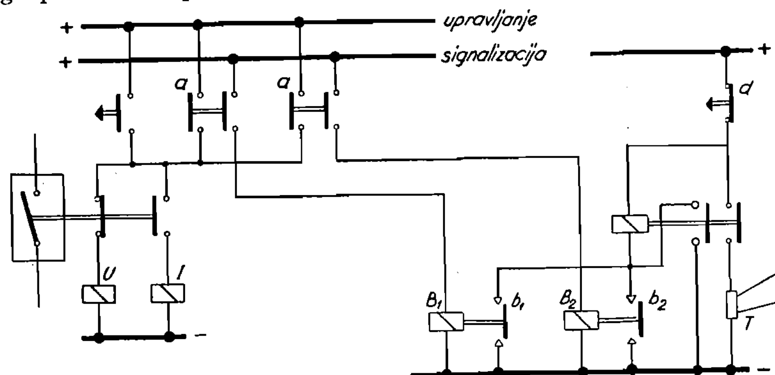
Signalizacija se aktivira prolaznim kontaktom (kontakt c na sl. 8.26) na signalnoj sklopki učinske sklopke. Zatvaranje toga kontakta dovoljno je da uzbudi relej D, koji zatvara preko kontakta d strujni krug trube T. Truba ostaje uključena i nakon otvaranja prolaznog kontakta, jer strujni krug releja D ostaje zatvoren preko kontakta d. Truba će ostati uključena sve dok se pritiskom na tipkalo ne prekine strujni krug i trube i releja D. Tada se otvara kontakt d, koji ostaje otvoren i nakon zatvaranja mirnog kontakta b. Osoblje je upozoreno, a truba će trubiti sve dok ne bude potvrđeno (pritiskom na tipkalo b) da je osoblje bilo upozoreno na nastalu promjenu.



Slika 8.27. Shema spoja grupne signalizacije ispada sklopke

Da se izbjegne signalizacija prilikom uklapanja i isklapanja tipkalom ili komandno-potvrdnom sklopkom postavlja se mirni kontakt a, koji je mehanički spojen s uređajem za upravljanje, a otvara se prilikom upravljanja tipkalom ili komandno-potvrdnom sklopkom. Mirni kontakt spojen je u seriju s prolaznim kontaktom.

U velikim rasklopnim postrojenjima signalizacija se provodi po grupama (npr. rasklopno postrojenje 110 kV, rasklopno postrojenje 35 kV itd.), ali s jednom signalnom trubom (sl. 8.27) koja javlja da je u jednoj od grupa došlo do promjene, dok signalna žarulja pokazuje grupu u kojoj



Slika 8.28. Shema spoja signalizacije djelovanja zaštitnih releja

je nastala promjena. Na taj se način lakše pronalazi sklopka koja je isklopila. Kad je osoblje upozoreno isklapa se truba kontaktom b, a žarulja kontaktom d.

Na opisani način pogonsko je osoblje upozoreno da je sklopka isklopila, ali se ne može ustanoviti što je bio uzrok isklapanja. Istina, svaki od zaštitnih releja ima signalnu markicu koja će pokazati da je relej djelovao, ali zaštitni releji nalaze se obično iza komandne ploče, pa je pregled otežan. Zbog toga svaki zaštitni relej (sl. 8.28) ima poseban signalni pomoćni relej (s padalicom ili žaruljom). Svi signalni releji koncentrirani su na jednom mjestu, što omogućuje brz pregled. Spomenuti signalni relej ima i prolazni kontakt za uklapanje trube. Kontakti a, kontakti su zaštitnog releja.

Na shemi sl. 8.28. odvojeni su strujni krugovi upravljanja od strujnih krugova signalizacije, kako se normalno i izvodi.

8.3. POMOĆNI STRUJNI KRUGOVI RASTAVLJAČA

A. Upravljanje i povratno javljanje

Upravljanje rastavljača izvodi se u principu na isti način kao upravljanje sklopkama. Treba međutim naglasiti da je moguće ručno i isklapanje i uklapanje rastavljača, što se može i izvesti (zbog smanjenja troškova izgradnje) kadgod se radi o postrojenju u kojemu — radi njegove veličine i važnosti brzih pogonskih zahvata — to neće štetno djelovati na pogon mreže.

Za povratno javljanje položaja rastavljača vrijedi sve ono što je rečeno o povratnom javljanju položaja sklopke.

B. Blokiranje rastavljača

Da bi se spriječili pogrešni zahvati osoblja izvodi se blokiranje rastavljača, sa zadatkom da spriječi otvaranje rastavljača, kad kroz njega protječe struja, i usprkos komande za otvaranje.

Blokiranje rastavljača — ako se izvodi — treba izvesti prema slijedećim principima.

a) Sabirnički rastavljač odvoda priključenog na jednostruke sabirnice treba da bude blokiran, da se ne može otvoriti kad je sklopka odvoda uklopljena.

b) Sabirnički rastavljač odvoda priključenog na dvostruke sabirnice treba tako blokirati da se ne može pokretati kad je uklopljena sklopka odvoda i kad je zatvoren drugi sabirnički rastavljač.

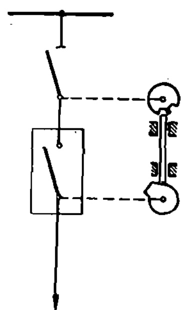
c) Izlazni rastavljač (npr. na odvodu dalekovoda ili kabela) treba tako blokirati sa sklopkom odvoda i rastavljačem za uzemljenje, da se ne može pokretati kad je sklopka uklopljena, a niti zatvoriti kad je zatvoren rastavljač za uzemljenje.

d) Analogno, dozemni rastavljač mora biti blokiran da se ne može zatvoriti kad je izlazni rastavljač zatvoren.

e) U postrojenju s dvostrukim sabirnicama i spojnim poljem rastavljači treba da budu blokirani prema b), ali samo kad nisu zatvorena oba rastavljača i sklopka u spojnom polju. Nasuprot tome, kad su uklopljena oba rastavljača i sklopka u spojnom polju, mogu se zatvoriti oba sabirnička rastavljača, a osim toga može se isključiti jedan od njih i pored toga što je sklopka odvoda uklopljena.

Blokiranje se može izvesti mehanički, pneumatski i električki. Mehaničko i pneumatsko blokiranje obično se izvodi samo za rastavljače sa sklopkom u istom odvodu, jer bi npr. blokiranje u vezi s aparatima u spojnom polju dovelo do kompliciranih mehanizama, odnosno do potrebe dodatnih cjevovoda znatne duljine za komprimirani zrak.

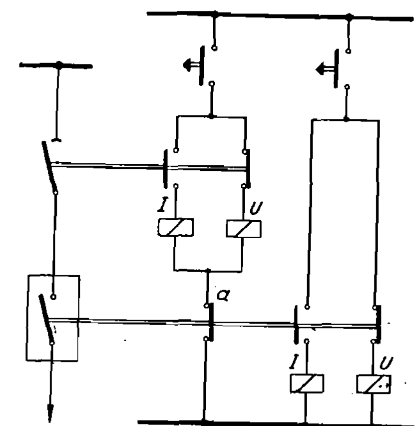
Mehaničko blokiranje izvodi se u postrojenjima s ručnim upravljanjem, a izvedeno je tako da je rastavljač mehanički zakočen, odnosno otkočen, već prema tomu da li je sklopka uklopljena ili isklopljena (sl. 8.29). Mehaničko blokiranje može se izvesti i ključevima, što je vrlo jednostavan način blokiranja. Ako hoćemo npr. blokirati sabirnički rastavljač u ovisnosti o položaju sklopke, do ključa ili ručice za otvaranje rastavljača može se doći samo onda kad je sklopka isklopljena. Naravno da nakon svakog otvaranja i zatvaranja rastavljača treba ponovo ključ ili ručicu za upravljanje spremiti, kako bi se prilikom slijedeće manipulacije osiguralo blokiranje rastavljača. To traži savjesnost osoblja, ali mora da prođe izvjesno vrijeme od odluke do izvršenja zahvata, što nije nepovoljno s obzirom na sigurnost pogona.



Slika 8.29. Mehaničko blokiranje rastavljača

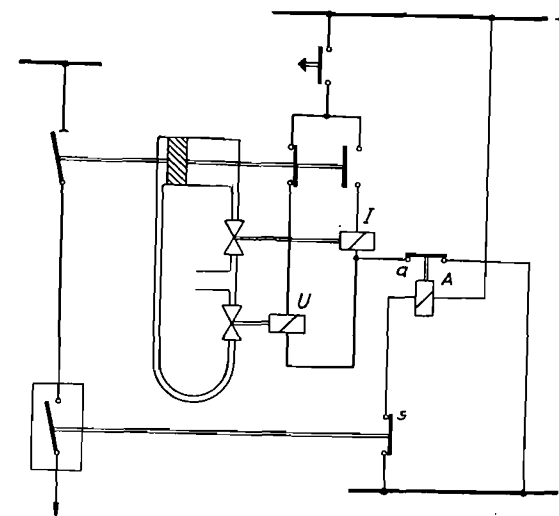
Pneumatsko blokiranje može se izvesti u postrojenjima u kojima se pogon i sklopaka i rastavljača vrši pomoću komprimiranog zraka. U tom se slučaju uklapanjem sklopke zatvara dovod komprimiranog zraka za pokretanje rastavljača.

U većim rasklopnim postrojenjima najčešće se upotrebljava električko blokiranje, koje se može izvesti bilo da se strujni krug upravljanja rastavljača spaja preko jednog od kontakata na signalnoj sklopki učinske sklopke (sl. 8.30), bilo da se postavi poseban pomoćni relej (A na sl. 8.31), koji se uzbuđuje preko kontakta signalne sklopke učinske sklopke, a preko vlastitog kontakta otvara ili zatvara strujni krug upravljanja rastavljača. Blokiranje s pomoćnim relejom upotrebljava se i pri blokiranju ventila za dovod komprimiranog zraka, što je shematski prikazano na sl. 8.31, pa se takva izvedba obično naziva elektropneumatskim blokiranjem.



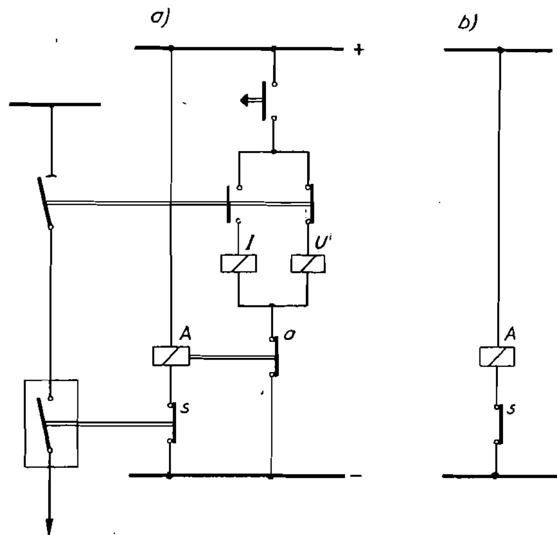
Slika 8.30. Blokiranje rastavljača preko kontakta (a) na signalnoj sklopki učinske sklopke

Električna shema blokiranja prikazana na sl. 8.31. može se upotrijebiti i za druge načine (magnetsko, motorno) upravljanja rastavljačima. Strujna shema takvog blokiranja (bez obzira na način upravljanja) prikazana je na sl. 8.32. Na istoj slici nacrtana je pojednostavnjena strujna shema blokiranja, na kojoj je prikazan samo svitak releja za blokiranje (relej A na sl. 8.31) i kontakt na signalnoj sklopki spojen u seriju s rele-



Slika 8.31. Blokiranje rastavljača pomoću releja A za blokiranje (na slici prikazano elektro-pneumatsko blokiranje)

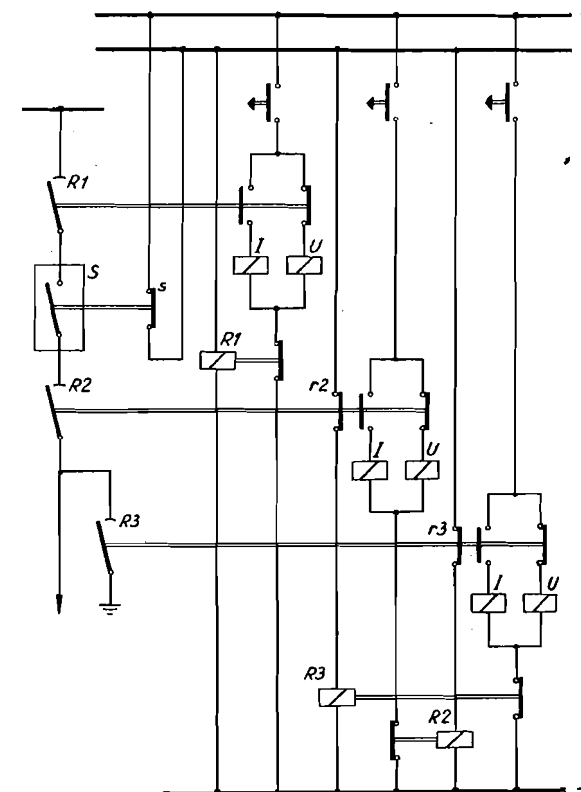
jom za blokiranje. Upravljanje rastavljačem moguće je samo kad kroz svitak releja protječe struja, pa tu činjenicu treba stalno imati u vidu kad se promatra djelovanje blokiranja pomoću pojednostavnjene sheme spoja.



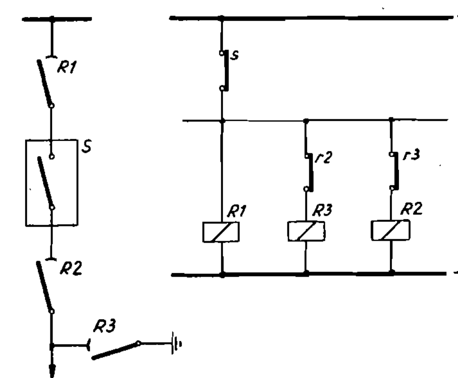
Slika 8.32. Strujna (a) i pojednostavnjena strujna shema (b) blokiranje rastavljača pomoću releja za blokiranje

Na sl. 8.33. prikazana je strujna shema blokiranja rastavljača na odvodu s izlaznim rastavljačem i rastavljačem priključenim na jednostruke sabirnice. Releji za blokiranje označeni su kao i rastavljači za čije blokiranje služe, dok su kontakti na signalnim sklopkama rastavljača označeni istim malim slovom kao i rastavljač. Na sl. 8.34. nacrtana je pojednostavnjena shema sa sl. 8.33. Prikazana izvedba blokiranja ispunjava uvjete a), c) i d). Zatvaranjem sklopke S otvara se naime kotakt s, što onemogućuje pokretanje svih rastavljača, jer svici releja ostaju bez napona. Rastavljači R2 (izlazni rastavljač) i R3 (rastavljač za uzemljenje) osim toga međusobno su blokirani. Kad je zatvoren npr. rastavljač R2, nemoguće je pokrenuti rastavljač R3, jer je otvoren kontakt r2, pa svitak releja R3 nema napona.

Na sl. 8.35. nacrtana je shema spoja rasklopnog postrojenja s dvostrukim sabirnicama, te pojednostavnjena shema blokiranja rastavljača, na kojoj položaj kontakata odgovara otvorenim sklopkama i rastavljačima. Tada je moguće upravljanje svim rastavljačima, ali nakon zatvaranja jednog od rastavljača istog odvoda ne može se pokrenuti drugi. Na sl. 8.36. prikazan je položaj kontakata na pojednostavnjenoj shemi za slučaj kad su odvodi priključeni na sabirnice I. Sada nije moguće pokrenuti ni jedan rastavljač odvoda, sve dok se ne isključi sklopka. Ali i tada je moguće samo otvoriti zatvoreni rastavljač, ali se ne može zatvoriti otvoreni, jer bi to dovelo do kratkog spajanja sabirnica. Upravljanje rastavljačima



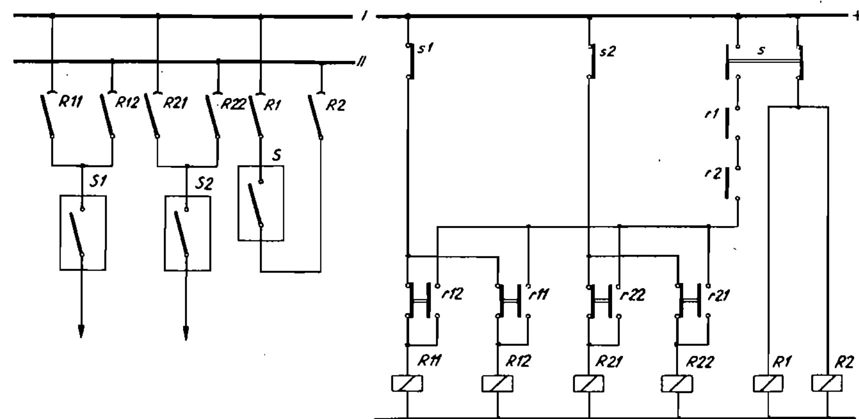
Slika 8.33. Strujna shema blokiranja rastavljača odvoda dalekovoda



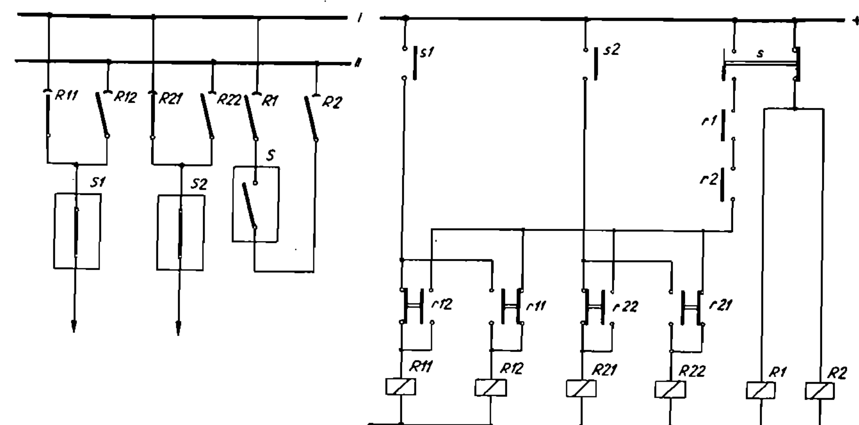
Slika 8.34. Pojednostavnjena strujna shema blokiranja rastavljača odvoda dalekovoda

u spojnom polju moguće je samo uz isklopljenu sklopku spojnog polja. Nakon zatvaranja rastavljača i spojne sklopke spojnog polja (položaj kontakata na sl. 8.37) mogu se zatvoriti otvoreni rastavljači odvodâ, ali se ne mogu otvoriti zatvoreni. Kad su oba rastavljača odvoda zatvorena, moguće je otvoriti bilo koji od njih. Na taj način moguće je izvesti sve operacije opisane u petom poglavlju, a da ne dođe do pogrešnog otvaranja, odnosno zatvaranja rastavljača.

Pogledajmo još blokiranje rastavljača u rasklopnom postrojenju s trostrukim sabnirnicama i s uzdužnim rastavljačima u sabirnicama. Na sl. 8.38. prikazana je shema spoja, a na sl. 8.39. pojednostavnjena strujna

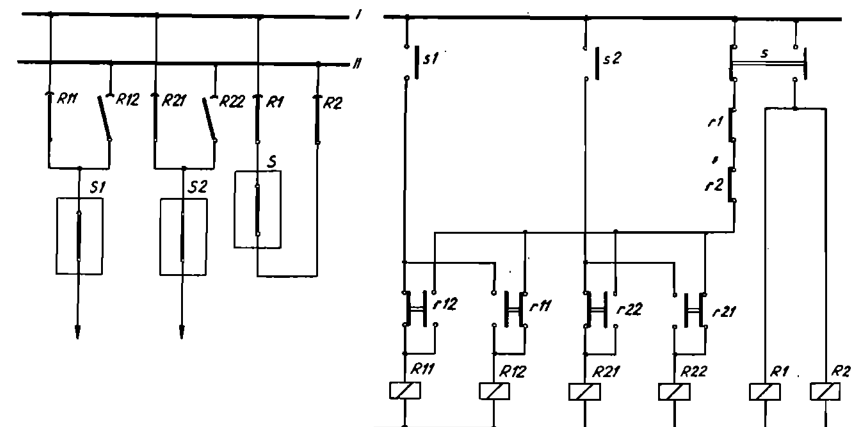


Slika 8.35. Pojednostavnjena shema blokiranja u postrojenju s dvostrukim sabirnicama (sve sklopke i svi rastavljači isklopljeni)

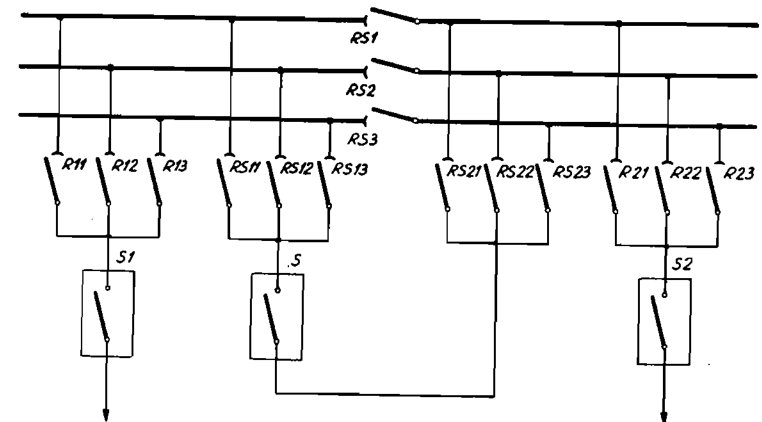


Slika 8.36. Pojednostavnjena shema blokiranja u postrojenju s dvostrukim sabirnicama (odvodi spojeni na sabirnice I, sklopka i rastavljači u spojnom polju isklopljeni).

Kapetanović Vedat

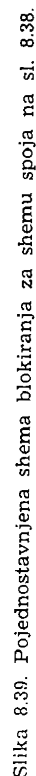


Slika 8.37. Pojednostavnjena shema blokiranja u postrojenju s dvostrukim sabirnicama (odvodi spojeni na sabirnice I, sklopka i rastavljači u spojnom polju uklopljeni)



Slika 8.38. Shema spoja odvoda i spojnog polja s trostrukim sabirnicama i uzdužnim rastavljačima

shema s položajem kontakata kad su isklopljene sve sklopke i svi rastavljači. U pogledu upravljanja rastavljačima u odvodu vrijedi sve kao i za slučaj rasklopnog postrojenja s dvostrukim sabirnicama. Upravljanje uzdužnim rastavljačima u sabirnicama moguće je samo kad je uklopljena sklopka i rastavljači koji spajaju istoimene sabirnice. Osim toga nije moguće zatvoriti dva rastavljača na istoj strani spojne sklopke, jer bi to značilo kratko spajanje sabirnica preko rastavljača. Upravljanje rastavljačima u odvodu uz uklopljenu sklopku odvoda moguće je kad je uklopljena spojna sklopka, po jedan rastavljač sa svake njezine strane i barem jedan uzdužni rastavljač.



Slika 8.39. Pojednostavnjena shema blokiranja za shemu spoja na sl. 8.38.

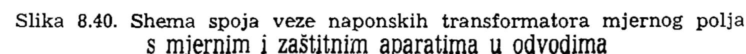
8.4. POMOĆNI STRUJNI KRUGOVI NAPONSKIH TRANSFORMATORA U MJERNOM I SPOJNOM POLJU

A. Dovođenje napona za mjerenje i zaštitu

Naponski transformatori u mjernom polju služe za napájanje naponskih svitaka mjernih instrumenata i zaštitnih releja u svim odvodima.

U rasklopnom postrojenju s jednostrukim sabirnicama dovoljno je sve te aparate priključiti na jedini slog naponskih transformatora. U rasklopnom postrojenju s dvostrukim sabirnicama neophodno je međutim da mjerni i zaštitni aparati budu priključeni na napon onih sabirnica na koje je spojen i odvod, jer je samo tako moguće osigurati ispravno mjerenje i zaštitu. U tu svrhu napon sekundarne strane naponskih transformatora dovodi se preko kontakata signalne sklopke rastavljača mjernog polja i odvoda (sl. 8.40), te je na taj način već zatvaranjem rastavljača osigurano dovođenje pravog napona na mjerne instrumente i zaštitne releje pojedinog odvoda.

Dovođenje pravog napona na aparate odvoda moglo bi se ostvariti postavljanjem sloga naponskih transformatora u svaki odvod. Takvo se rješenje međutim ne provodi u praksi zbog visokih troškova, jer bi se znatno povećao broj slogova naponskih transformatora.



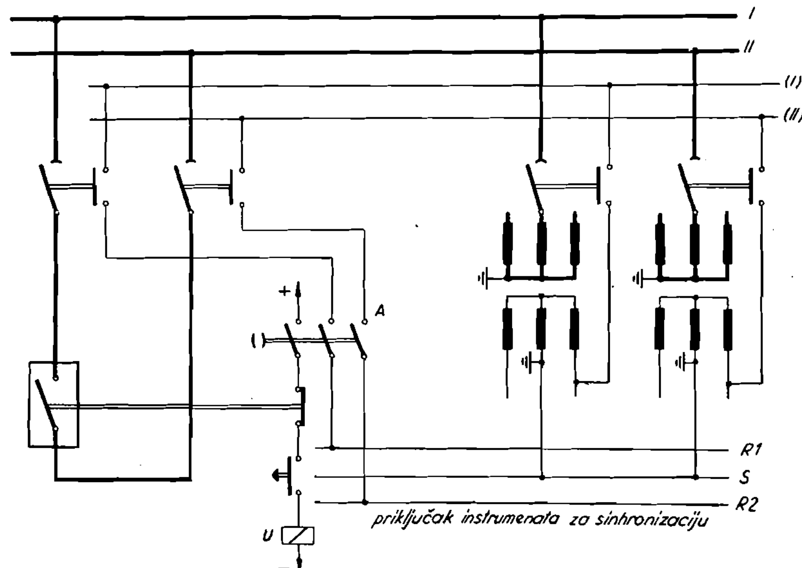
Slika 8.40. Shema spoja veze naponskih transformatora mjernog polja s mjernim i zaštitnim aparatima u odvodima

B. Strujni krugovi sinhronizacije

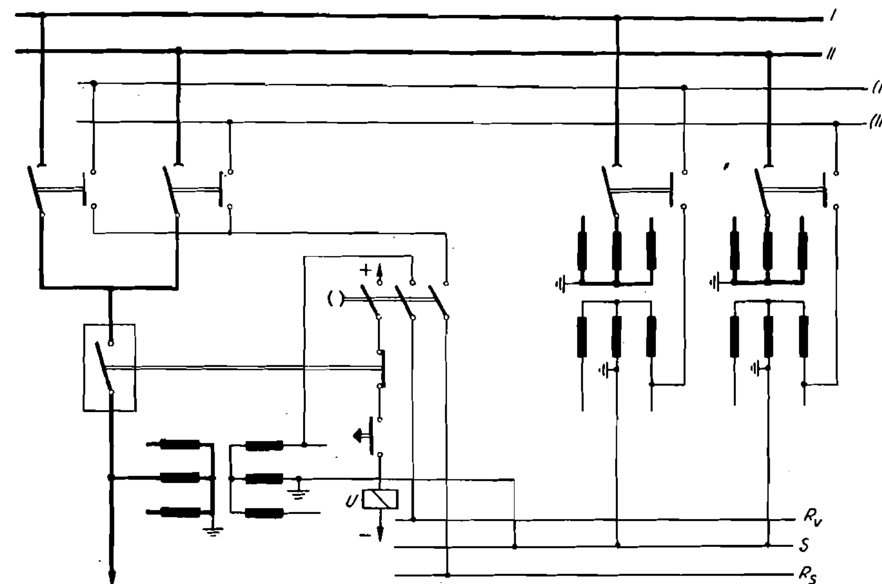
Instrumenti za sinhronizaciju opisani su u šestom poglavlju, dok pomoćni strujni krugovi sinhronizacije služe za dovođenje napona koje treba uspoređivati i dovoditi instrumentima za sinhronizaciju.

Od sheme spoja sinhronizacije traži se, osim jednostavnosti posluživanja, i sigurnost da neće doći do pogrešnih uklapanja. U rasklopnim postrojenjima s dvostrukim i višestrukim sabirnicama većina pogrešnih sinhroniziranja nastaje zbog dovođenja krivog napona na instrumente za usporedbu ili — a to je slučaj i u rasklopnim postrojenjima s jednostrukim sabirnicama — zbog uklapanja krive sklopke. Da se osigura dovođenje naponâ koje treba uspoređivati, dovodi se napon sa sekundarne strane naponskih transformatora u mjernom polju preko kontakata rastavljača, a odatle na posebnu sklopku sa sinhronizaciju (A na sl. 8.41). Sklopkom za sinhronizaciju uklapaju se strujni krugovi na pomoćne sahirnice (R1, R2 i S na sl. 8.41), na koje su priključeni instrumenti za usporedbu napona i frekvencija.

Na sl. 8.41. prikazana je shema spoja za međusobnu sinhronizaciju sabirnica pomoću spojne sklopke. Kad su zatvoreni rastavljači u spojnom i mjernom polju, priprema za sinhronizaciju vrši se uklapanjem sklopke za sinhronizaciju. Uklapanje te sklopke vrši se posebnim ključem koji se ne može izvaditi dok je sklopka uključena, pa se ne mogu istodobno uključiti dvije takve sklopke, jer u rasklopnom postrojenju postoji samo jedan ključ. Uklapanjem sklopke za sinhronizaciju dovodi se napon i do kontakta tipkala, čijim se zatvaranjem daje impuls za uklapanje sklopke. Na taj način onemogućeno je pogrešno uklapanje



Slika 8.41. Shema spoja sinhronizacije spojnom sklopkom



Slika 8.42. Shema spoja sinhronizacije sklopkom odvoda

sklopke. Osim posebne sklopke za sinhronizaciju upotrebljavaju se i drugi sistemi za osiguranje od pogrešnog uklapanja (čepovi i sl.), s istom funkcijom kao i sklopka.

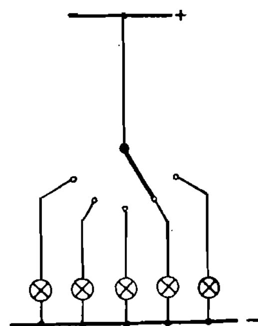
Osim sinhronizacije pomoću spojne sklopke, može se predvidjeti i sinhronizacija pomoću sklopke u odvodu (sl. 8.42). Analogno shemi na sl. 8.42. izveli bismo shemu za sinhronizaciju u rasklopnom postrojenju s jednostrukim sabirnicama, s tom razlikom što bismo dovod sa sekundarnog namota naponskog transformatorau mjernom polju spojili direktno na sklopku za sinhronizaciju, bez posredovanja kontakata na signalnim sklopkama rastavljača.

8.5. POMOĆNI STRUJNI KRUGOVI U ODVODU UČINSKOG TRANSFORMATORA

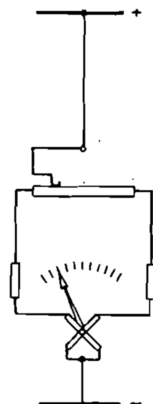
Za upravljanje sklopkama i rastavljačima u transformatorskom odvodu upotrebljavaju se isti uređaji kao i za upravljanje aparatima u ostalim odvodima. Treba napomenuti da zaštita od unutarnjih kvarova u transformatoru (diferencijalna zaštita, lopatica u Buchholzovu releju, pojava razlike napona između kotla i zemlje) djeluje na sklopke na obje strane transformatora.

Zaštitni uređaji, kojih je zadatak samo signalizacija opasnosti (gornji plovak Buchholzova releja, kontrola strujanja ulja i vode i sl.) djeluju na pomoćni relej koji ima vizuelnu i akustičnu signalizaciju, kao što je npr. prikazano na sl. 8.26.

Mjerenjem napona na obje strane opterećenog regulacionog transformatora ne može se ustanoviti s kakvim prijenosnim omjerom radi transformator, odnosno mjerenjem napona ne može se odrediti položaj regulacione sklopke, jer omjer napona ovisi i o padu napona u transformatoru. Zbog toga se normalno izvodi signalizacija položaja regulacione sklopke (sl. 8.43). Promjenom položaja regulacione sklopke mijenja se



Slika 8.43. Shema spoja signalizacije položaja regulacione sklopke transformatora pomoću žarulja



Slika 8.44. Shema spoja signalizacije položaja regulacione sklopke transformatora pomoću potenciometarskog spoja i instrumenta s ukrštenim svicima

i položaj kontakta koji zatvara strujni krug signalne žarulje. Te žarulje osvjetljuju redne brojeve koji označavaju otcjepe regulacione sklopke. Da se smanji broj potrebnih vodova između regulacione sklopke i komandne prostorije, upotrebljava se potenciometarski spoj i instrument s ukrštenim svicima (sl. 8.44), čija kazaljka pokazuje položaj regulacione sklopke.

8.6. AKUMULATORSKA BATERIJA U RASKLOPNOM POSTROJENJU

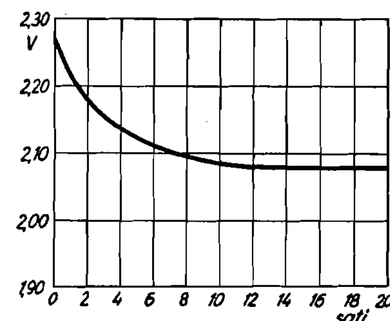
A. Napon, kapacitet i punjenje baterije

Kao nazivni naponi za strujne krugove istosmjerne struje dolaze u obzir naponi od 24, (60), 110 i 220 V. Napon od 24 V primjenjuje se samo za mala postrojenja, uglavnom za strujne krugove signalizacije. Napon od 24 V za strujne krugove upravljanja primjenjuje se naime samo onda, ako su kontakti zaštitnih i pomoćnih releja izvedeni od srebra. Za proboj sloja oksida na bakrenim kontaktima potreban je napon od 18 do 20 V, što je vrlo blizu naponu baterije (24 V), pa primjena toga napona ne daje dovoljnu sigurnost za ispravno djelovanje releja. U postrojenjima srednje veličine najčešće se primjenjuje napon od 110 V, u elektranama, rasklopnim postrojenjima 110 i 220 kV, te u većim rasklopnim postrojenjima nižih napona potreban je napon od 220 V. Taj napon naročito je prikladan kad je predviđeno postavljanje sigurno-

sne rasvjete koja se napaja iz istosmjernog izvora kad nestane izmjeničnog napona, na koji je u normalnom pogonu priključena rasvjeta.

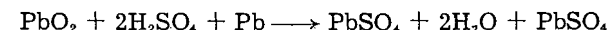
Za akumulatorsku bateriju mogu se upotrijebiti olovni ili alkalijski akumulatori. I pored nekih prednosti alkalijskih akumulatora (lakši su i manje osjetljivi) za baterije u nešto većim rasklopnim postrojenjima upotrebljavaju se olovni akumulatori jer imaju veću korisnost (omjer predanih — za vrijeme punjenja — i primljenih — za vrijeme pražnjenja — ampersati Ah), konstantniji napon i jeftiniji su.

Elektromotorna sila potpuno napunjenog članka iznosi približno 2,1 V. Neposredno nakon punjenja elektromotorna sila je nešto viša, ali nekoliko sati poslije punjenja padne na navedenu vrijednost na kojoj ostaje — ako se ne prazni — dulje vremena (sl. 8.45). Utjecaj gustoće sumporne kiseline prikazan je na sl. 8.46. Za gustoće od 1,05 do 1,30 kg dm^3 postoji linearna ovisnost između elektromotorne sile i gustoće sumporne kiseline. S povišenjem temperature raste elektromotorna sila članka, ali utjecaj povišenja temperature nije znatan.



Slika 8.45. Primjer smanjenja elektromotorne sile članka akumulatorske baterije nakon punjenja (gustoća kiseline 1,20, temperatura 16°C).

Prije početka pražnjenja na pozitivnoj ploči nalazi se olovni dioksid (PbO_2), a na negativnoj spužvasto olovo (Pb). Obje ploče uronjene su u razrijeđenu sumpornu kiselinu (H_2SO_4). Za vrijeme pražnjenja dolazi do slijedeće kemijske reakcije

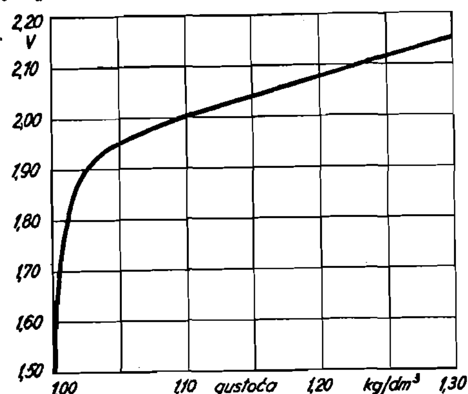


$$PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb \longrightarrow PbSO_4 + 2H_2O + PbSO_4$$

Pražnjenjem se, dakle, smanjuje gustoća sumporne kiseline, što dovodi do smanjenja elektromotorne sile, na što djeluje i postepeno pretvaranje aktivne mase na obje ploče u olovni sulfat. U praksi se s pražnjenjem prestaje prije nego što je sva aktivna masa pretvorena u olovni sulfat, jer tada bi došlo do stvaranja prevelike količine sulfata (sulfatiranje ploča), pri čemu bi se ploče pokrile tvrdim slojem sulfata olova, koji se prilikom punjenja tek djelomično pretvara u aktivnu masu. Normalno je dopušteno pražnjenje do elektromotorne sile 1,83 V po članku.

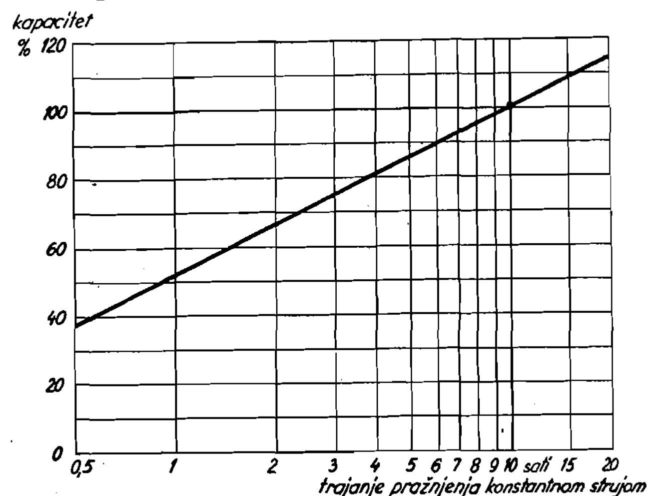
Kapacitet akumulatorske baterije računa se u Ah. Taj kapacitet međutim ovisan je o intenzitetu pražnjenja baterije, pa je potrebno navesti

i trajanje pražnjenja na koje se odnosi kapacitet baterije. Ako je npr. kapacitet baterije 200 Ah, uz 10-satno pražnjenje, baterija je sposobna da kroz to vrijeme daje 20 A. Na sl. 8.47. prikazana je ovisnost kapaciteta baterije o trajanju pražnjenja, uz pretpostavku da se prazni konstantnom



Slika 8.46. Ovisnost elektromotorne sile članka akumulatorske baterije o gustoći sumporne kiseline

strujom. Smanjenje kapaciteta pri pražnjenju većom strujom nastaje zbog toga što se kemijska reakcija najprije događa na površini aktivne mase. Aktivna masa se na površini brzo istroši, elektromotorna sila se smanji, pa se zbog toga smanji i kapacitet baterije, unatoč tome što ispod površinskog sloja ima još aktivne mase. Osim toga brzina difuzije



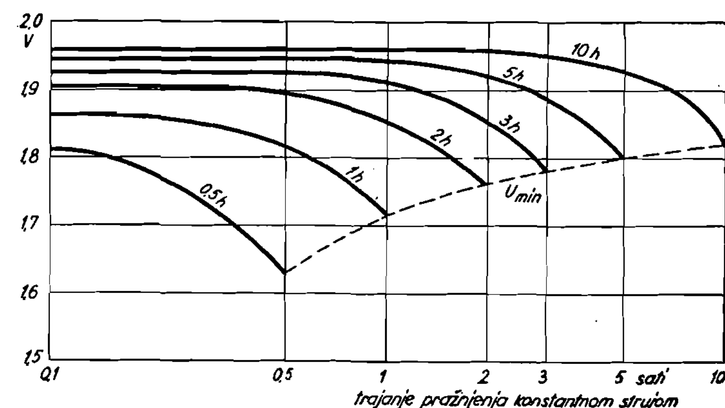
Slika 8.47. Ovisnost kapaciteta akumulatorske baterije o trajanju pražnjenja konstantnom strujom

kiseline još više utječe na kapacitet. Gustoća kiseline, koja je u neposrednom kontaktu s aktivnom masom pločâ, brzo se smanjuje pri pražnjenju velikom strujom. Da bi se povećao kapacitet, potrebno je da se difuzijom razrijeđena kiselina zamijeni gušćom. Ako se smanjenje gustoće odvija brže od nadoknađivanja difuzijom, elektromotorna sila postajat će niža, pa će i kapacitet baterije biti manji.

Napon na priključnicama članka za vrijeme pražnjenja iznosi

$$U = E - I\,R_u \qquad \ldots (8.1)$$

gdje su: E elektromotorna sila, I struja pražnjenja, a R_u unutarnji otpor članka. Unutarnji otpor članka iznosi oko 0,15 do 0,25 Ω Ah. Tako npr. unutarnji otpor članka kapaciteta 72 Ah iznosi između 2,1 i $3{,}5 \cdot 10^{-3}$ Ω. Unutarnji otpor se smanjuje sa starenjem baterije, a raste s pražnjenjem, da bi na kraju pražnjenja dostigao dvostruku vrijednost.



Slika 8.48. Krivulje pražnjenja akumulatorske baterije za različita trajanja pražnjenja konstantnom strujom

Na sl. 8.48. prikazane su krivulje napona na priključnicama akumulatorske baterije za različita trajanja pražnjenja konstantnom strujom. Veličina struje pražnjenja ovisi o kapacitetu baterije (sl. 8.47). Napon na kraju pražnjenja je to manji, što je kraće vrijeme pražnjenja, odnosno što je veća struja pražnjenja, zbog većeg pada napona.

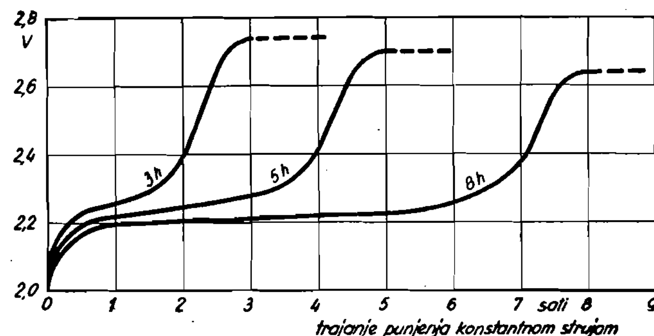
Napon članka za vrijeme punjenja (sl. 8.49) znatno je veći od napona za vrijeme pražnjenja, jer je tada

$$U = E + I\,R_u \qquad \ldots (8.2)$$

U početku punjenja napon naglo raste, jer koncentracija kiseline u blizini ploče raste vrlo brzo. Kad gušća kiselina počne difundirati napon će dalje lagano rasti, sve do pred kraj punjenja. Tada će napon naglo porasti, što je znak da je baterija napunjena. Daljnjim punjenjem gustoća kiseline ne raste, u članku se vrši elektroliza vode, što dovodi do razvijanja plinova, pa je i to znak da je baterija napunjena. Da bi se postiglo što

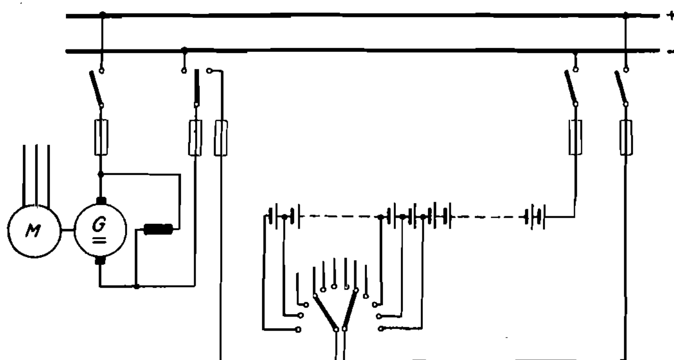
bolje punjenje baterije, na kraju se struja smanjuje na trećinu normalne struje punjenja.

Ampersatna korisnost (omjer između predanih i primljenih ampersati) iznosi 0,85 do 0,95, dok kilovatsatna korisnost (omjer predanih i primljenih kWh) iznosi 0,65 do 0,70.



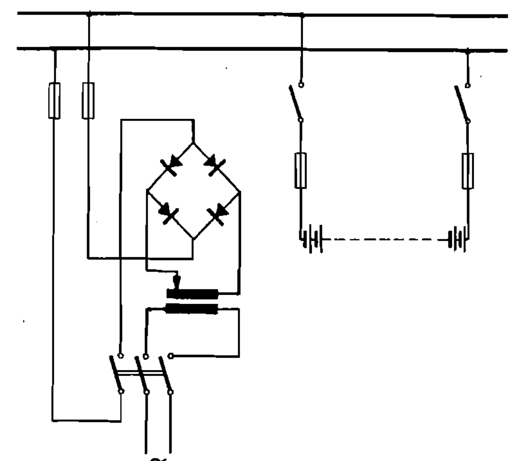
Slika 8.49. Krivulja punjenja akumulatorske baterije za različita trajanja punjenja konstantnom strujom

U vrlo mala rasklopna postrojenja mogu se postaviti prenosive akumulatorske baterije, koje se nakon ispražnjenja zamjenjuju napunjenim. Time otpada uređaj za punjenje akumulatora. To je međutim moguće ostvariti samo kad je potreban mali napon i mali kapacitet baterije. U ostalim slučajevima moramo upotrijebiti stacionarnu akumulatorsku bateriju, koja se puni u samom rasklopnom postrojenju.



Slika 8.50. Shema spoja za povremeno punjenje akumulatorske baterije

Primjenjuju se dva načina punjenja akumulatorske baterije: povremeno, preko dvostruke preklopke (sl. 8.50) i trajno (sl. 8.51). Povremeno punjenje danas se rijetko primjenjuje.



Slika 8.51. Shema spoja trajnog punjenja akumulatorske baterije

Potreban broj članaka s uređajem za povremeno punjenje, određuje se iz relacije

$$n = \frac{U_n}{1{,}83} \qquad \ldots (8.3)$$

gdje su U_n nazivni napon baterije, a 1,83 V najniža elektromotorna sila članka. Računato je s najnižom dopuštenom elektromotornom silom, a ne s najnižim naponom na priključnicama, jer trajno opterećenje baterije nije znatno; ono je naime znatno niže od maksimalne struje pražnjenja. Za vrijeme punjenja baterije treba da se omogući napajanje potrošača, pa je zato i potrebna dvostruka preklopka (sl. 8.50). Najviši napon punjenja iznosi 2,75 V, pa je potrebno isključiti Δn članaka da potrošači ne bi dobili previsok napon. Broj članaka koje treba isključiti iznosi

$$\Delta n = n - \frac{U_n}{2{,}75} \qquad \ldots (8.4)$$

Budući da napon na bateriji za vrijeme punjenja postepeno raste (sl. 8.49), nužno je postepeno isključivanje članaka.

Pri trajnom punjenju može se računati da je napon članka 2,1 V (sl. 8.45), pa je potreban broj članaka

$$n_t = \frac{U_n}{2{,}1} \qquad \ldots (8.5)$$

Potreban broj članaka naveden je u tab. 8.1.

Do analognih relacija dolazimo za alkalijske akumulatore (nikalj — kadmijevi akumulatori), ako računamo da je najniži napon 1,1 V (8.3), a napon za vrijeme pražnjenja 1,4 V (8.5).

TABLICA 8.1.

Potreban broj članaka akumulatorske baterije s olovnim akumulatorima

Naziv napon baterije V	24	60	110	220
povremeno punjenje n	13	33	60	120
trajno punjenje n_t	11	29	53	105

Kapacitet akumulatorske baterije treba tako odabrati da bude dovoljno rezerve za opskrbu potrošača u slučaju prekida punjenja. Zbog toga treba poznavati potrošače, koje možemo podijeliti u tri grupe: stalni (signalne žarulje, svici za blokiranje i sl.), povremeni (svici za upravljanje, zaštitni i pomoćni releji i sl.) i sigurnosna rasvjeta. Pri određivanju potrebnog kapaciteta akumulatorske baterije polazi se od potroška pojedinih potrošača koji su poznati iz podataka tvornica, zatim se određuje broj potrošača koji će istovremeno biti priključeni, te trajanje tog priključka za vrijeme prestanka punjenja. Prilikom određivanja broja priključenih potrošača treba računati na to da će svi stalni potrošači i sigurnosna rasvjeta biti priključeni za cijelo vrijeme prestanka punjenja.

TABLICA 8.2.

Primjer određivanja maksimalnog opterećenja i ukupnog potroška za vrijeme prestanka punjenja akumulatorske baterije

	pojedinačni potrošak W	broj uključenih ptrošača	maksimalno opterećenje W	trajanje maksimalnog opterećenja h	ukupni potrošak Wh
Stalni potrošači					
Pokazivači položaja	2	60	120	4	480
Signalne žarulje	15	60	900	4	3600
Svici za blokiranje	6	40	240	4	960
Ostali stalni potrošači	—	—	400	4	1600
Ukupno stalni potrošači	—	—	1660	—	6640
Povremeni potrošači					
Upravlj. sklopkama 110 kV	1800	1	1800	0,25	450
Upravlj. sklopkama 35 kV	130	1	130	0,25	32
Upravlj. rastavljačima	130	1	130	0,25	32
Zaštitni i pomoćni releji	—	—	500	1	500
Ukupno	—	—	2560	—	1014
Sigurnosna rasvjeta	60	30	1800	4	7200
Sveukupno	—	—	6020	—	14854

Povremeni potrošači bit će pojedinačno i kratkotrajno priključeni, no pri tom treba računati da će se za vrijeme prestanka napona i nekoliko puta priključivati istovrsni potrošači. S kolikim trajanjem prestanka punjenja treba računati ovisi o prilikama u mreži. Obično se računa da prestanak punjenja traje 4 sata. U tab. 8.2. prikazan je primjer određivanja potroška potrošača priključenih na akumulatorsku bateriju. Na osnovu takvog proračuna određuju se trajna struja pražnjenja (u normalnom pogonu), maksimalna struja pražnjenja i kapacitet baterije. Te veličine za slučaj prikazan u tab. 8.2, uz pretpostavku da je napon baterije 220 V, isnose

$$\text{trajna struja pražnjenja} \quad \frac{1660}{220} = 7{,}5 \text{ A}$$

$$\text{maks. struja pražnjenja} \quad \frac{6020}{220} = 27{,}4 \text{ A}$$

$$\text{kapacitet baterije} \quad \frac{14854}{220} = 67{,}6 \text{ Ah}$$

Pri izboru kapaciteta baterije za 10-satno pražnjenje treba uzeti u obzir da se izračunati kapacitet odnosi na kraće trajanje pražnjenja (za slučaj u tab. 8.2. treba računati s trosatnim pražnjenjem, jer su povremeni potrošači priključeni znatno kraće od 4 sata, a njihov udio nije velik). Prema tome se izračunati kapacitet odnosi na trosatno pražnjenje, pa prema sl. 8.47. kapacitet za 10-satno pražnjenje iznosi 67,6 : 0,75 = 90,1 Ah. Na temelju tog kapaciteta određuje se tip akumulatora prema podacima tvornica (tab. 8.3).

TABLICA 8.3.

Primjer podataka o člancima olovnih akumulatora

Tip članka	Članci s pločama L1						Članci s pločama L2			
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L8	L10	L12	L14
Kapacitet Ah pri 10-satnom pražnjenju	36	72	108	144	180	216	288	360	432	504
Struja punjenja A	9	18	27	36	45	54	72	90	108	126
Završno punjenje A	3	6	9	12	15	18	24	30	36	42
Unutarnji otpor 10^{-4} Ω	60	30	20	13	12	10	7	6	5	4,3
Najveći dopušteni osigurač A	20	35	60	80	100	125	160	200	225	260

Da se spriječi oštećenje ploča akumulatora, do čega može doći ako je struja pražnjenja prevelika, određen je maksimalno dopušteni osigurač kojim se baterija zaštićuje od preopterećenja i kratkog spoja. Najčešće je dopušten osigurač kojemu je nazivna struja jednaka struji jednosatnog

pražnjenja, no neke tvornice dopuštaju i osigurače do trostruke struje jednosatnog pražnjenja. Struju jednosatnog pražnjenja možemo odrediti iz relacije

$$I_{1h} = 0{,}52\, K_{10h} \qquad \ldots (8.6)$$

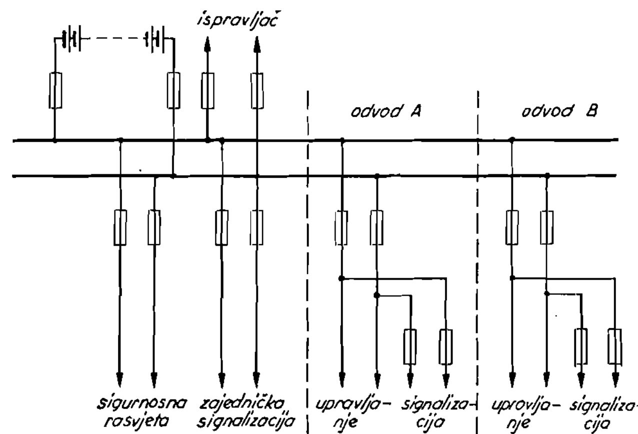
gdje su K_{10h} kapacitet uz 10-satno pražnjenje, a 0,52 smanjenje kapaciteta (sl. 8.47) pri jednosatnom pražnjenju.

Podatak o unutarnjem otporu članka u tab. 8.3. odnosi se na nov, svježe napunjen članak.

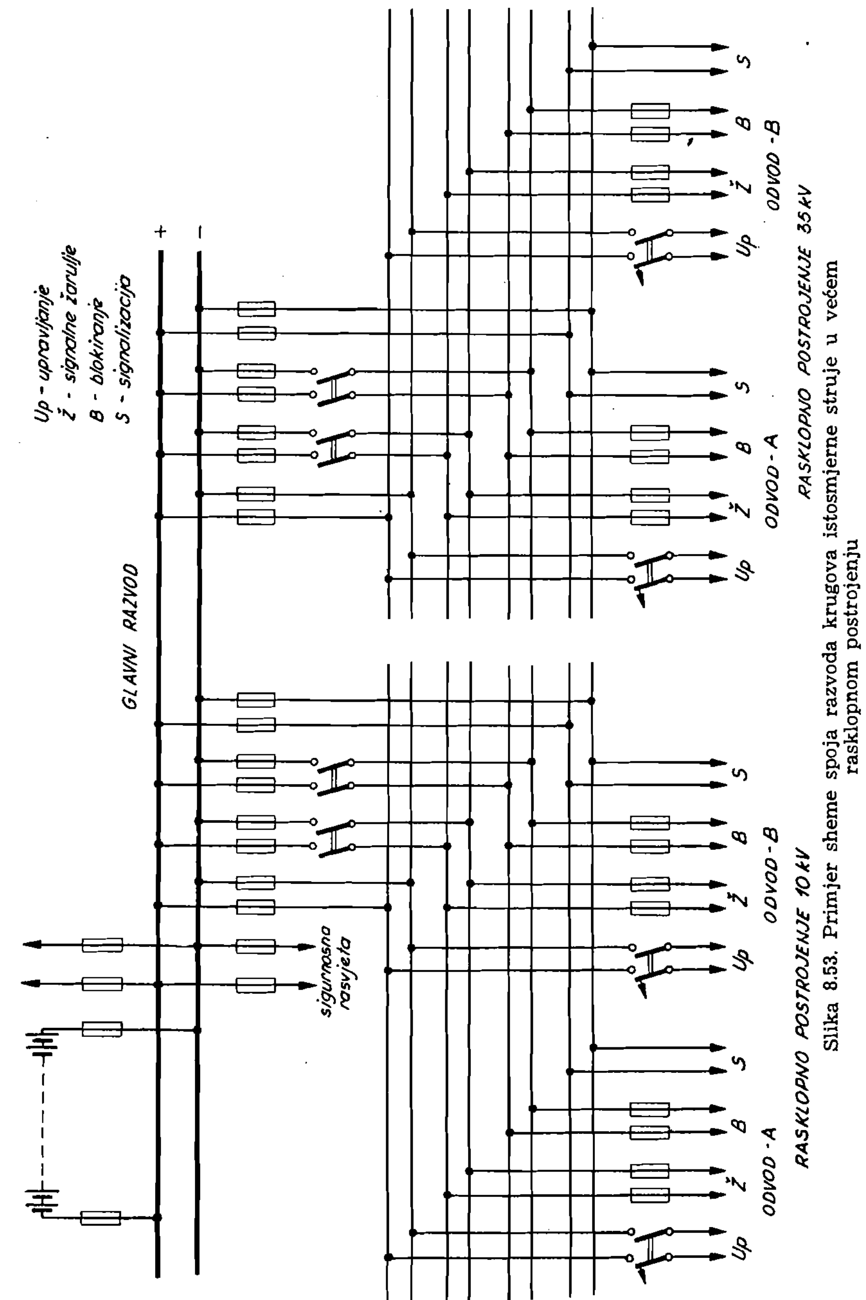
Opisani način određivanja kapaciteta akumulatorske baterije bit će dovoljan ako se u postrojenju ne nalaze veći istosmjerni motori (tu ne spadaju motori za pogon sklopaka) ili ako sklopke nemaju magnetski pogon. U tom slučaju potrebno je kontrolirati da li je pad napona za vrijeme tog kratkotrajnog opterećenja u dopuštenim granicama. Uređaji napajani istosmjernom strujom moraju ispravno djelovati ako napon na njima varira između $+10\%$ i -15% nazivnog napona, dok uređaji za isklapanje treba da djeluju i za odstupanje $\pm 25\%$ od nazivnog napona. Smanjenje pada napona može se postići izborom akumulatorske baterije većeg kapaciteta (manji unutarnji otpor baterije!) ili povećanjem presjeka vodova koji spajaju bateriju i potrošače. U mnogo je slučajeva ekonomično da se ukupni pad napona podijeli tako da 2/3 otpadne na bateriju, a 1/3 na vodove. Naravno da se tačnija raspodjela padova napona može izvršiti usporedbom troškova, jer manji pad napona u bateriji traži bateriju većeg kapaciteta, a manji pad napona u vodovima veći presjek vodova.

B. Zaštita istosmjernih strujnih krugova

Osiguranje istosmjernih strujnih krugova provodi se obično u grupama po pojedinim odvodima, kako se kvar ne bi prenio iz jedne grupe u drugu. Da se još više lokalizira kvar, posebno se osiguravaju krugovi za upravljanje od krugova za signalizaciju itd.



Slika 8.52. Primjer sheme spoja razvoda istosmjerne struje u manjem rasklopnom postrojenju

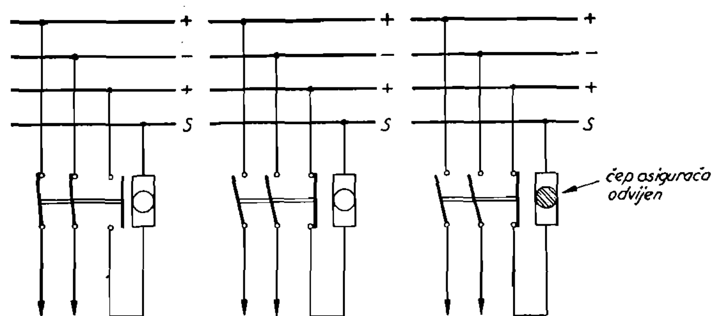


Slika 8.53. Primjer sheme spoja razvoda krugova istosmjerne struje u većem rasklopnom postrojenju

Na sl. 8.52. prikazana je shema razvoda pomoćnih strujnih krugova manjeg rasklopnog postrojenja. Osigurači za strujne krugove signalizacije za svaki odvod spojeni su u seriju s osiguračima u strujnom krugu upravljanja. Ako, dakle, signalne žarulje svijetle, sigurno je da su osigurači u krugu upravljanja ispravni. Selektivnost se postiže postavljanjem osigurača manje nazivne struje (npr. 2 A) u odvod za signalizaciju, nego u zajednički odvod (npr. 10 A).

Na sl. 8.53. vidi se shema razvoda pomoćnih strujnih krugova za veće rasklopno postrojenje. Odijeljen je razvod za rasklopno postrojenje 35 kV od onoga za postrojenje 10 kV, a osim toga su za svaki odvod izvedeni odijeljeni strujni krugovi za upravljanje, signalizaciju i sl. Za krugove sa stalnim potrošačima postoji mogućnost centralnog isklapanja, radi smanjenja pražnjenja baterije. Krugovi upravljanja osigurani su zaštitnom sklopkom.

Na prikazanim shemama spoja (sl. 8.52. i 8.53) u većini odvoda predviđeni su osigurači. Upotrebi osigurača s gledišta osiguranja nema prigovora, ali to nije najpovoljnije rješenje zato, jer pogonsko osoblje neće biti upozoreno kad pregori osigurač. Zbog toga se u nekim slučajevima (krugovi upravljanja na sl. 8.53) postavljaju zaštitne sklopke s pomoćnim kontaktom koji uključuje akustički signal (trubu ili zvonce). Signalizacija funkcionira na već opisani način (tač. 8.2E). Na sl. 8.54. prikazana je



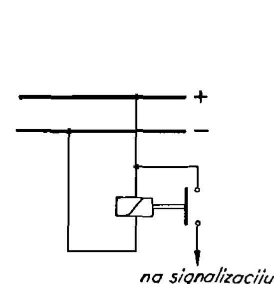
Slika 8.54. Shema spoja djelovanja signalizacije ispada zaštitne sklopke pomoćnog strujnog kruga

jednostavna izvedba signalizacije ispada zaštitne sklopke. U slučaju kratkog spoja otvara se zaštitna sklopka i zatvara krug signalizacije (+ sabirnica signalizacije, pomoćni kontakt, čepni osigurač, sabirnica S, truba ili zvonce, — pol). Pogonsko osoblje upozoreno je da je nastao kvar, pa nakon što je određen strujni krug na kojem je on nastao odvija čep osigurača, čime je prekinut strujni krug signalizacije, a uređaj za signalizaciju sposoban je da javlja drugi kvar. Nakon ponovog uklapanja sklopke potrebno je zaviti čep osigurača.

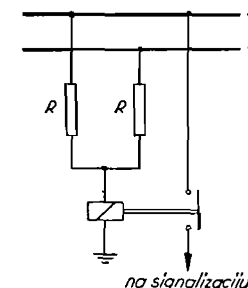
Osigurači, odnosno zaštitne sklopke pojedinih strujnih krugova za pojedini odvod, smješteni su u ćeliji odvoda, na komandnoj ploči ili na ploči releja. U malom rasklopnom postrojenju, koje nema komandne ploče, praktički je jedino mjesto u ćeliji odvoda. Ako se radi o većem rasklopnom postrojenju u zgradi ili na otvorenom, najzgodnije mjesto je ploča za releje.

O postojanju istosmjernog napona ovisi djelovanje zaštite i mogućnost upravljanja, pa je zbog toga potrebno da pogonsko osoblje bude upozoreno na nestanak istosmjernog napona ili na pad napona ispod dopuštene visine. Da se to postigne, priključuje se na sabirnice podnaponski relej, koji preko svog kontakta uzbuđuje akustički signal (sl. 8.55).

Osim toga je potrebno da pogonsko osoblje bude upozoreno na nastanak *zemnog spoja u razvodu istosmjerne struje* (spoj releja prikazan je na sl. 8.56), jer se pogon vrši s neuzemljenim polom, pa jedan zemni spoj ne utječe na pogon. Upozorenje je, međutim, potrebno zato da bi se čim prije popravila greška, jer drugi zemni spoj može dovesti do oštećenja i premoštenja pojedinih dijelova instalacija.



Slika 8.55. Shema spoja podnaponskog releja za signalizaciju nestanka ili sniženja istosmjernog napona



Slika 8.56. Shema spoja releja za signalizaciju zemnog spoja u razvodu istosmjerne struje

Za mjerenje u mreži istosmjerne struje postavljaju se obično ampermetri u krug punjenja i u krug akumulatorske baterije, dok se voltmetar postavlja na istosmjerne sabirnice. Neki put se postavlja voltmetar s preklopkom, koja omogućuje mjerenje napona među sabirnicama, među priključnicama akumulatorske baterije, te između polova i zemlje.

8.7. KOMPRESORSKO POSTROJENJE

A. Općenito

Za pogon rastavljača i sklopaka, te za gašenje luka u sklopkama, kad se radi o pneumatskim sklopkama, upotrebljava se komprimirani zrak slijedećih nazivnih tlakova (koji u pogonu variraju u niže navedenim granicama)

5 atp (4,25—5,5 atp) za pogon sklopaka i rastavljača,

11 atp (9,5—11,5 atp) za gašenje luka u sklopkama za napone do 35 kV, te za pogon sklopaka i rastavljača,

15 atp (13—16 atp) za gašenje luka i pogon sklopaka i rastavljača svih napona,

30 atp (27—31 atp) samo kao viši tlak u kompresorskom postrojenju.

Komprimirani zrak za pogon, a pogotovo za gašenje luka, mora biti suh, ali za sušenje nisu potrebni posebni uređaji, jer se komprimiranjem izlučuje vlaga koju je zrak donio sa sobom iz atmosfere. Zrak može sadržavati samo određenu maksimalnu količinu vlage (tab. 8.4), koja ovisi samo

TABLICA 8.4.

Maksimalna količina vlage u zraku u ovisnosti o temperaturi zraka

Temperatura zraka °C	Maksimalna količina vlage g/m³	Temperatura zraka °C	Maksimalna količina vlage g/m³
—5°	3,24	35°	39
0°	4,84	40°	51
5°	6,8	45°	65
10°	9,4	50°	83
15°	12,8	55°	104
20°	17,3	60°	130
25°	23,0	65°	161
30°	30,3	70°	198

o temperaturi, a neovisna je o tlaku. Kad zrak sadrži maksimalnu količinu vlage, kažemo da mu je relativna vlažnost 100%. Zrak je zasićen vlagom samo za vrijeme kiše ili magle, dok inače sadrži manju količinu vlage. Omjer između stvarne i maksimalne količine vlage nazivamo relativnom vlažnošću.

Ako npr. kompresor upija zrak temperature 20 °C, relativne vlažnosti 0,60, sa svakim m³ zraka upijat će kompresor 0,60 · 17,3 = 10,38 g vode. Komprimiranjem zraka od $p_1 = 1$ ata do npr. $p_2 = 16$ ata smanjit će se volumen $V_1 = 1$ m³ zraka na volumen

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{1 \cdot 1}{16} = 0{,}062 \text{ m}^3 \qquad \ldots (8.7)$$

Ta količina zraka uz istu temperaturu, uz pretpostavku da je zrak ohlađen nakon komprimiranja na temperaturu okoline, može sadržavati 0,062 · 17,3 = 1,17 g vlage, dok će se ostatak vodene pare 10,38 — 1,17 = = 9,21 g kondenzirati i sakupiti se na dnu rezervoara komprimiranog zraka. Ako se međutim komprimirani zrak ne hladi, pri određivanju volumena zraka nakon kompresije treba uzeti u račun i apsolutne temperature prije (T_1) i nakon (T_2) kompresije, pa volumen dobivamo iz izraza

$$V_2 = V_1 \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} \qquad \ldots (8.8)$$

Iz navedene formule dobit ćemo veći volumen, pa i veću količinu vlage. S povišenjem temperature ostaje veća količina vlage u zraku, jer tada se povećava i maksimalna količina vlage (tab. 8.4). Normalno se međutim zrak posebno ne hladi nakon komprimiranja (osim u međustepenima kompresora), ali se rezervoari zraka često postavljaju izvan zgrade da bi se snizila temperatura komprimiranog zraka.

Da se osigura odvođenje kondenzata, postavljaju se na izlazu iz kompresora, na dnu rezervoara i na najnižoj tački cjevovoda ventili za odvođenje vode, koji se povremeno otvaraju.

Za tlakove do 10 atp upotrebljavaju se jednostepeni ili dvostepeni kompresori, za više tlakove dvostepeni ili trostepeni. Kompresori su tjerani asinhronim motorom s kratkospojenim rotorom. Uklapanje i isklapanje vrši se preko kontaktnog manometra, kad tlak postigne minimalno, odnosno maksimalno dopuštenu visinu. Upravljanje zaštitnom sklopkom motora manjih kompresora vrši se neposredno preko kontakta manometra, a većih posredstvom pomoćnog releja i sklopnika.

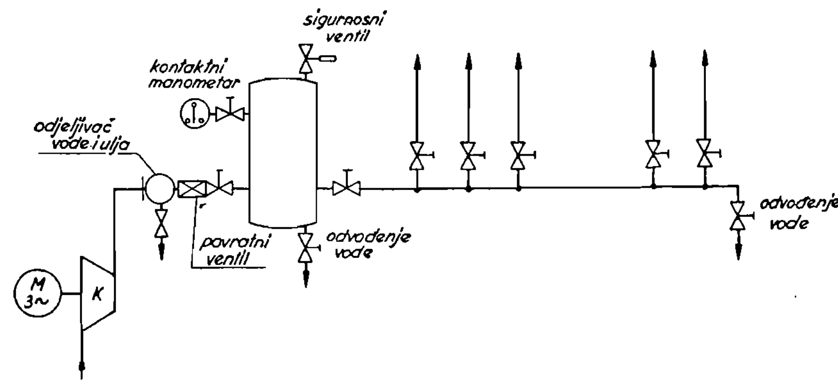
Da bi pogonsko osoblje bilo obaviješteno o sniženju tlaka postavlja se i signalni kontaktni manometar, koji uklapa strujni krug pomoćnog releja kad tlak dostigne najnižu granicu.

Komprimirani zrak razvodi se bakrenim (za manje promjere) ili čeličnim (za veće promjere) cijevima. U malim postrojenjima s ćelijama ili poljima u jednom redu glavni dovod zraka izvodi se kao radijalni vod, dok je u većem postrojenju glavni dovod izveden kao prstenast vod. Cijevi za razvod zraka postavljene su s nagibom od barem 2%, da bi se na najnižoj tački mogao postaviti ventil za odvođenje vode.

B. Manje kompresorsko postrojenje

Manje kompresorsko postrojenje služi za komprimiranje i razdiobu zraka za upravljanje sklopkama i rastavljačima. Shema spoja prikazana je na sl. 8.57.

Svrha je proračuna određivanje potrebnog volumena rezervoara komprimiranog zraka i učina kompresora. Polazi se od pretpostavljenog broja

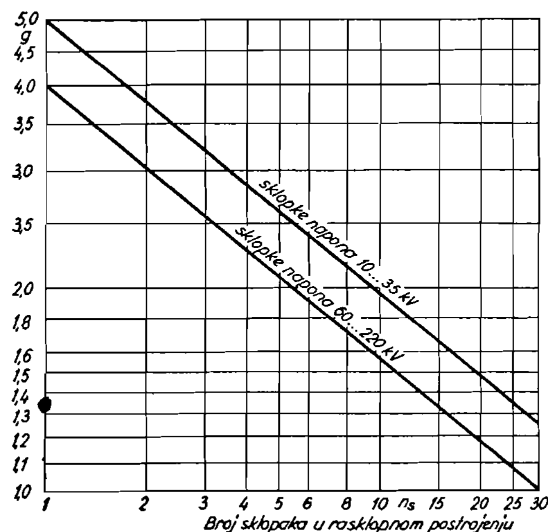


Slika 8.57. Shema razvoda zraka manjeg kompresorskog postrojenja

operacija (uklapanje i isklapanje) između dva punjenja rezervoara. Potrebna količina zraka pri tlaku od 1 ata određuje se iz relacije

$$V = g\,(n_s\,Q_s + n_r\,Q_r)\ \mathrm{m^3} \qquad \ldots (8.9)$$

gdje su: n_s broj sklopaka, n_r broj rastavljača u konačnoj izgradnji promatranog rasklopnog postrojenja, Q_s i Q_r potrebna količina zraka za jedno uklapanje i jedno isklapanje sklopke, odnosno rastavljača u m³ uz 1 ata. Veličina g jest faktor istodobnosti, definiran dijagramom na sl. 8.58 (Lit. 39). Rezervoar treba da osigura potrebnu količinu zraka



Slika 8.58. Faktor istodobnosti (g) u ovisnosti o broju sklopaka za određivanje veličine kompresorskog postrojenja za pogon sklopaka i rastavljača

prema (8.9), uz sniženje od nazivnog (p_n) do najnižeg tlaka (p_{min}). Potreban volumen V_R rezervoara zraka, koji može uz navedeno sniženje tlaka osigurati volumen V preračunat na tlak $p_o = 1$ ata, iznosi

$$V_R = \frac{p_o\,V}{p_n - p_{min}} = \frac{V}{\Delta p}\ \mathrm{m^3} \qquad \ldots (8.10)$$

Potrebno je, osim toga, osigurati da kroz izvjesno, kratko vrijeme t_k (10 do 20 min), kompresor dopuni rezervoar količinom zraka V, pa je učin kompresora

$$P = \frac{V}{t_k}\ \mathrm{m^3/min.} \qquad \ldots (8.11)$$

Neka npr. u rasklopnom postrojenju 35 kV i 10 kV postoji $n_s = 12$ sklopaka i $n_r = 30$ rastavljača, čiji je potrošak za jedno isklapanje i jedno

uklapanje $Q_s = 0{,}025$ m³ i $Q_r = 0{,}004$ m³ zraka kod tlaka 1 ata. Faktor istodobnosti iznosi (sl. 8.58) $g = 1{,}8$. Potreban volumen zraka (8.9) iznosi

$$V = 1{,}8\,(12 \cdot 0{,}025 + 30 \cdot 0{,}004) = 0{,}656\ \mathrm{m^3} = 656\ \mathrm{l}$$

Volumen rezervoara (8.10), uz sniženje tlaka od $p_n = 5$ atp do $p_{min} = 4{,}25$ atp, jeste

$$V_R = \frac{0{,}656}{0{,}75} \cong 0{,}9\ \mathrm{m^3} = 900\ \mathrm{l}$$

Ako računamo sa $t_k = 15$ min, učin je kompresora (8.10)

$$P = \frac{0{,}9}{15} = 0{,}06\ \mathrm{m^3/min} = 60\ \mathrm{l/min.}$$

C. Veće kompresorsko postrojenje

Veće kompresorsko postrojenje potrebno je gotovo uvijek (osim gdje se radi o minimalnom broju sklopaka) kad je komprimirani zrak potreban za gašenje luka u sklopkama. Tada se postavljaju dva kompresora, svaki za pun učin, pa je na taj način osigurana 100%-tna rezerva. Normalno se takvo postrojenje izvodi s rezervoarima višeg tlaka od pogonskog tlaka sklopaka, kako bi se smanjio potreban volumen rezervoara. Osim toga postavljaju se rezervoari nižeg tlaka, koji su s rezervoarom višeg tlaka spojeni preko redukcionog ventila, upravljanog preko kontaktnog manometra, u ovisnosti o tlaku u rezervoaru nižeg tlaka (sl. 8.59). Od ukupne količine zraka dio a dobiva se iz rezervoara nižeg tlaka, a dio $1-a$ iz rezervoara višeg tlaka. Udio a potrebno je prilikom proračuna ocijeniti i naknadno ga korigirati, da bi se dobio povoljan odnos volumenâ rezervoarâ. Povoljno je da se veći dio potrebnog zraka osigura iz rezervoara višeg tlaka. U rasklopnim postrojenjima vrlo visokih napona (velika izgrađena površina!) postavljaju se rezervoari u samom postrojenju, kako bi se osigurala potrebna rezerva zraka što bliže sklopkama. Osim toga i sklopke imaju vlastiti rezervoar za komprimirani zrak zbog istih razloga. Te rezervoare treba uzeti u obzir prilikom određivanja volumena rezervoara nižeg tlaka.

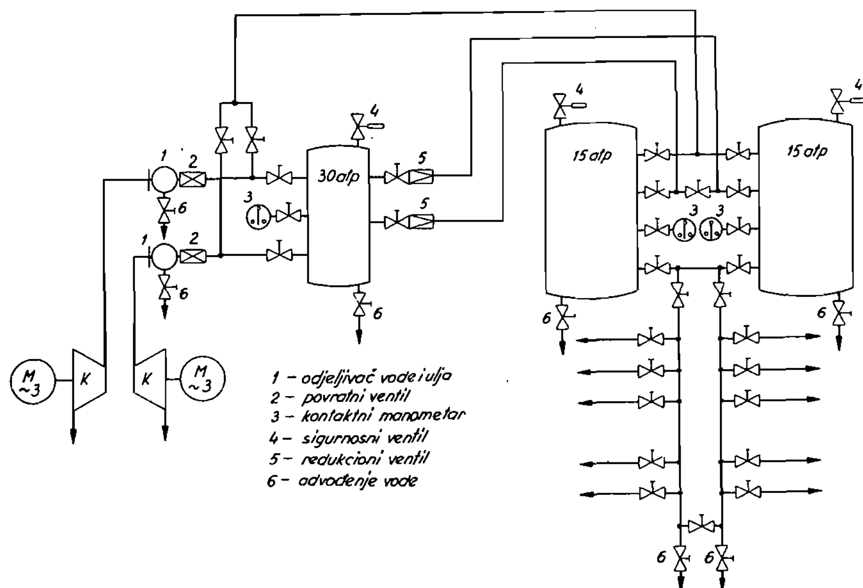
Ako sa i (m³) označimo potrebnu količinu zraka pri tlaku od 1 ata za jedno uklapanje i jedno isklapanje sklopke, te ako sa s (m³/h) označimo potrebnu količinu zraka opet reduciranu za 1 ata, koja stalno struji kroz sklopku zbog održavanja unutarnjosti sklopke u suhom stanju, potrebna količina zraka kroz 24 sata iznosi

$$V_d = n_d\,i + 24\,n_s\,s\ \mathrm{m^3/dan} \qquad \ldots (8.12)$$

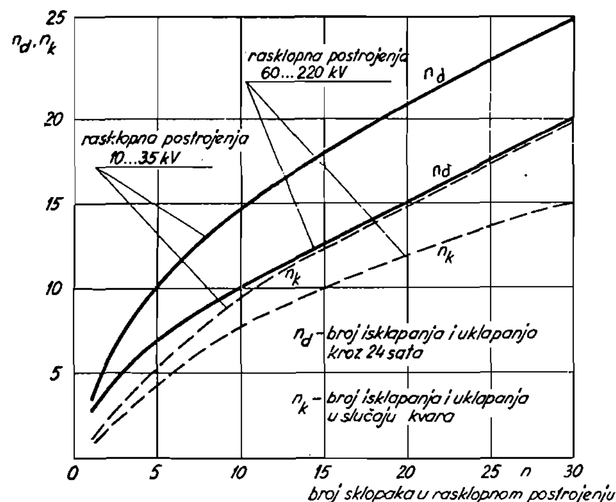
gdje je n_d broj uklapanja i isklapanja sklopaka tokom 24 sata. Ovisnost n_d o broju sklopaka prikazana je na sl. 8.60 (Lit. 114).

Učin kompresora, uz pretpostavku da treba da radi 4 sata dnevno jest

$$P = \frac{V_d}{4} = \frac{n_d\,i}{4} + 6\,n_s\,s\ \mathrm{m^3/h} \qquad \ldots (8.13)$$



Slika 8.59. Shema razvoda zraka većeg kompresorskog postrojenja



Slika 8.60. Broj isklapanja i uklapanja sklopaka kroz 24 sata i u slučaju kvara u ovisnosti o broju sklopaka u rasklopnom postrojenju

Izračunati učin odnosi se na jedan kompresor, jer drugi — kako je spomenuto — služi kao rezerva.

Rezervoari zraka dimenzioniraju se prema zahtjevu da je rezerva zraka dovoljna za isklapanje i uklapanje sklopaka u slučaju kvara. Potrebna je količina zraka

$$V_k = n_k \, i \ \text{m}^3 \qquad \ldots (8.14)$$

gdje je n_k broj uklapanja i isklapanja sklopaka nakon kvara (sl. 8.60). Za vrijeme uklapanja i isklapanja nakon kvara može se zanemariti potrošak zraka koji stalno struji kroz sklopke.

Dio potrebnog zraka nalazi se u rezervoarima sklopaka. Rezervoar sklopke volumena V_{Rs} (m^3), uz sniženje tlaka Δp_n može dati količinu zraka

$$r = \Delta p_n V_{Rs} \ \text{m}^3 \qquad \ldots (8.15)$$

pri tlaku 1 ata. Uzimajući u obzir dio a, koji označuje udio rezervoara zraka nižeg tlaka, potreban volumen rezervoara nižeg tlaka iznosi

$$V_{Rn} = a \, \frac{n_k (i - r)}{\Delta p_n} \ \text{m}^3 \qquad \ldots (8.16)$$

Označivši sa Δp_v dopušteno sniženje tlaka u visokotlačnom rezervoaru, volumen visokotlačnog rezervoara jest

$$V_{Rv} = (1 - a) \, \frac{n_k (i - r)}{\Delta p_v} \ \text{m}^3 \qquad \ldots (8.17)$$

Može se još provesti kontrola trajanja pogona kompresora nakon kvara. Potrebno vrijeme za dopunjavanje rezervoarâ iznosi

$$t_k = \frac{n_k \, i}{P} \ \text{h} \qquad \ldots (8.18)$$

Ako se pokaže da je vrijeme t_k predugo, potrebno je odabrati kompresore većeg učina.

Kada komprimirani zrak služi za gašenje luka, može se prilikom proračuna zanemariti potrošak zraka za upravljanje sklopkama i rastavljačima.

DEVETO POGLAVLJE

IZVEDBE RASKLOPNIH POSTROJENJA

9.1 OPĆENITO O IZVEDBAMA RASKLOPNIH POSTROJENJA

Izbor izvedbe rasklopnog postrojenja ovisi o nizu faktora, među koje možemo ubrojiti: nazivni napon, tip sklopke, zahtjevi s obzirom na zaštitu od luka i dodira, preglednost i mogućnost kontrole, raspoloživ prostor za izgradnju, shema spoja glavnih strujnih krugova i sl.

S obzirom na izvedbu postoji znatna razlika između rasklopnih postrojenja srednjeg napona (6 do 35 kV) i onih visokog napona (60 do 400 kV), pa će to biti i posebno razmatrano.

U današnjim postrojenjima tip sklopke ne utječe toliko na izvedbu postrojenja kao što je utjecao u prošlosti, kad su se upotrebljavale uljne sklopke. Tada je, naime, kako je spomenuto u četvrtom poglavlju, bilo potrebno odijeliti sklopku od ostalog postrojenja da bi se spriječilo oštećenje postrojenja u slučaju da se ulje upali i sklopka eksplodira. Današnje sklopke bilo koje izvedbe nisu opasne za rasklopno postrojenje, pa njihov tip ne utječe značajnije na izvedbu postrojenja.

Najveće razlike u izvedbama postrojenja za srednje napone izazivaju različita shvaćanja zaštite od luka, do kojeg može doći zbog proboja ili preskoka, odnosno krive manipulacije (u prvom redu otvaranjem opterećenih rastavljača). Postoje izvedbe bez ikakvih zaštitnih pregrada od materijala otpornog prema djelovanju luka, pa tada nema pregrada ni među vodovima ni između sabirnica i rastavljača, a niti prema hodnicima (takva postrojenja često se izvode u romanskim zemljama). Druga su krajnost s obzirom na zaštitu od luka i dodira oklopljena postrojenja. Ona mogu biti oklopljena željeznim limom ili oklopom od ljevanog željeza. Izvedbe s oklopom od ljevanog željeza karakteristične su za Veliku Britaniju, što je posljedica njihovih propisa o sigurnosti. Srednje rješenje jest izvedba u ćelijama s pregradama među njima i — za daljnje povećanje sigurnosti — s pregradama unutar ćelije.

Svakako da najveću preglednost i mogućnost kontrole pružaju postrojenja bez ikakvih pregrada, koja su i najjeftinija. Nasuprot tome takva postrojenja najmanje su sigurna s obzirom na opasnost od luka i pružaju najmanju zaštitu pri dodiru.

Razlikujemo, dakle, otvorena i oklopljena postrojenja. U otvorena ubrajamo i ona s vatrostalnim pregradama i ona bez njih. Rasklopna postrojenja za srednje napone (do 35 kV) izvode se i kao otvorena i kao

oklopljena, dok se za više napone (iznad 35 kV) izvode samo kao otvorena i to bez ikakvih pregrada, jer je opasnost od luka znatno manja zbog većih razmaka i manjih struja kratkog spoja.

TABLICA 9.1.

Najmanje visine nad podom i najmanji razmaci od ograda prema našim Tehničkim propisima iz 1957. godine

Nazivni napon mreže kV	Najmanja visina nezaštićenih vodiča nad podom u hodnicima i pristupima		Najmanji razmak vodiča od			
	u zgradi mm	na slobodnom mm	zaštitne ograde (branici) u zgradi mm	zaštitne rijetke mreže u zgradi mm	guste mreže ili lima u zgradi mm	zaštitne ograde (branici) na slobodnom mm
1	2500	—	500	108	58	—
3	2500	—	500	124	74	—
6	2500	—	500	148	98	—
10	2500	—	500	180	130	—
20	2500	—	500	260	210	500
35	2550	2920	500	380	330	560
60	2800	3220	580	580	530	780
110	3300	3820	980	980	930	1200
220	—	5140	—	—	—	2400

TABLICA 9.2.

Najmanje visine nad podom i najmanji razmaci od ograda prema njemačkim propisima

Nazivni napon mreže kV	Najmanja visina vodiča nad podom hodnika u zgradi mm	Najmanji razmak vodiča od				
		zaštitne ograde		od zaštitne mreže		od lima u zgradi mm
		u zgradi mm	na slobodnom mm	u zgradi mm	na slobodnom mm	
1	2500	500	—	140	—	70
3	2500	500	—	175	—	105
6	2500	500	—	200	—	130
10	2500	500	500	225	280	155
20	2500	500	500	280	360	210
30	2500	500	560	360	460	290
60	2800	670	780	570	680	500
110	3300	1000	1200	900	1100	830
220	4400	—	2400	—	2300	—

S obzirom na smještaj, razlikujemo rasklopna postrojenja u zgradama i na slobodnom. Otvorena rasklopna postrojenja za srednje napone izvode se normalno u zgradama (samo iznimno, za napone 35 kV, mogu se naći postrojenja na slobodnom), dok se otvorena postrojenja za više napone u pravilu izvode na slobodnom. Samo u gusto naseljenim područjima ili unutar tvornica s velikim opterećenjima opravdan je smještaj u zgradi

TABLICA 9.3.

Minimalni razmaci (Lit. 116)

Nazivni napon kV	Razmak između vodiča i uzemljenih dijelova mm	Razmak između vodičima mm	Visina vodiča iznad tla u pristupnim stazama mm	Horizontalni razmak među vodičima za izvođenje radova mm
132	1250	1450	4250	3500
220	2050	2400	5000	4250
380	3200	3750	6250	5500
500	3700	4400	6750	6000

TABLICA 9.4.

Uobičajeni razmaci sabirnica

Nazivni napon kV	Razmaci sabirnica	
	u zgradi mm	na slobodnom mm
1	120	—
3	150	—
6	250	—
10	300	—
20	350	500
30 (35)	400	700
60	900	1300
110	1400	2200
220	—	4400

rasklopnih postrojenja iznad 35 kV. Oklopljena rasklopna postrojenja mogu se smjestiti bilo na slobodnom, bilo u zgradi.

Radi zaštite od dodira propisima su određeni najmanji razmaci (preskočne daljine), koji su navedeni u tab. 1.5. Osim toga, propisima su određene najmanje visine nezaštićenih vodiča nad podom u hodnicima, pristupnim prostorijama ili pristupnim stazama (tab. 9.1), te najmanji razmaci između vodiča i ograde, mreže ili lima (tab. 9.1). Podaci u našim propisima nešto se razlikuju od njemačkih (VDE 0101/43), što je vidljivo iz tab. 9.2. Radi ilustracije navodimo i minimalne razmake koje se predlažu u novije vrijeme. Za razliku od razmaka prema propisima u tab. 9.3. navode se (prema Lit. 116) podaci o razmacima između vodičâ i uzemljenih dijelova, visine vodiča iznad pristupnih putova i horizontalni razmaci među vodičima, da bi se osigurao potreban razmak za izvođenje radova.

Minimalni razmaci navedeni u tablicama vrijede za nadmorske visine do 1000 m, a za svakih daljnjih 500 m treba povećati razmake za 5%.

U tab. 9.4. navedeni su uobičajeni razmaci sabirnica koji međutim nisu određeni propisima. Razmaci među sabirnicama veći su od najmanjih

(tab. 1.5) radi veće sigurnosti, a u nekim slučajevima povoljno je — pogotovo pri nižim naponima — odabrati još veće razmake zbog smanjenja sila među vodičima.

Propisima su određene i minimalne širine hodnika. Treba razlikovati hodnike za posluživanje i nadzor (upravljanje, transport aparata i sl.) i hodnike samo za nadzor. Osim toga treba uzeti u obzir da li se samo s jedne, ili s obje strane hodnika, nalazi rasklopno postrojenje, odnosno dijelovi takvog postrojenja pod visokim naponom. Ako se rasklopno postrojenje nalazi samo s jedne strane hodnika, širina hodnika za posluživanje ne smije biti manja od 1000 mm, a širina hodnika za nadzor ne manja od 800 mm. Kad se rasklopno postrojenje nalazi s obje strane hodnika, najmanje su širine 1200, odnosno 1000 mm. Širina prolaza za nadzor i posluživanje u rasklopnim postrojenjima na slobodnom treba da iznosi barem 1200 mm (mjereno između uzemljenih dijelova aparata, zaštitnih ograda, zidova ili nosne konstrukcije). U praksi se međutim izvode širi hodnici. Jedan je od razloga mogućnost transporta. Osim toga hodnik se izvodi to širi, što su viši naponi i što su veće rasklopne snage, kako bi se pogonsko osoblje osjećalo sigurnije. Dug hodnik izvodi se širi od kratkog. U tab. 9.5. navedene su uobičajene širine hodnikâ.

TABLICA 9.5.

Uobičajene širine hodnika u rasklopnim postrojenjima

Nazivni napon kV	Rasklopno postrojenje s jedne strane hodnika		Rasklopno postrojenje s obje strane hodnika	
	Širina hodnika za posluživanje mm	Širina hodnika za nadzor mm	Širina hodnika za posluživanje mm	Širina hodnika za nadzor mm
do 10	1600	1200	1800	1400
20	1800	1400	2000	1600
30 (35)	2000	1600	2000	1800
60	2200	1800	2500	2000
110	2400	2000	3000	2200

Treba napomenuti da su u daljnjem izlaganju izvedbe rasklopnih postrojenja prikazane u prvom redu s obzirom na tipove postrojenja, te na principijelan raspored sabirnica i aparata, jer detalji izvedaba prelaze okvir ove knjige.

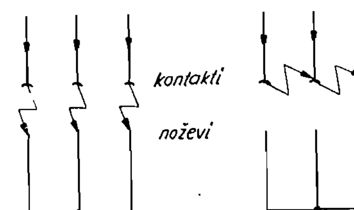
9.2. OTVORENE IZVEDBE RASKLOPNIH POSTROJENJA SREDNJEG NAPONA (DO UKLJUČIVO 35 kV)

A. Luk u rasklopnom postrojenju

Pojava luka u rasklopnom postrojenju posljedica je proboja izolacije među fazama ili između faze i zemlje, do čega dolazi bilo zbog povišenja napona, bilo zbog smanjenja izolacije. Koordinacijom izolacije i upotrebom odvodnika prenapona mogu se lakše spriječiti proboji zbog povišenja napona, nego proboji koji nastaju zbog smanjenja izolacije. Do smanjenja izolacije naime dolazi zbog stranih tijela koja mogu doći u rasklopno postrojenje (alat, životinje, vlaga i sl.), zbog deformacija dijelova postrojenja prouzrokovanih mehaničkim silama i zbog ionizacije zraka. Prva dva uzroka mogu se otkloniti izvedbom oklopljenih postrojenja, dovoljnim razmacima, upotrebom izolacija koje ne upijaju vlagu, mehanički dovoljno dimenzioniranom izvedbom i sl. Najčešći je uzrok ionizacije otvaranje opterećenih rastavljača, a to je ujedno i najčešći uzrok pojavi luka u rasklopnom postrojenju. Otvaranje opterećenih rastavljača sprečava se blokiranjem rastavljača (osmo poglavlje).

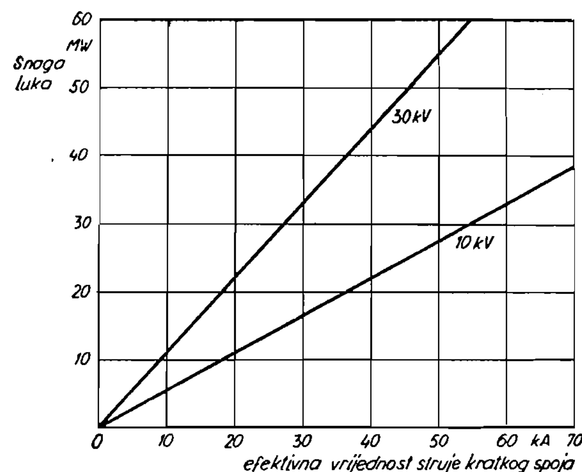
I pored svih mjera dolazi do pojave luka u rasklopnom postrojenju. Vrlo je rijedak slučaj da zbog djelovanja luka dođu pod visoki napon uzemljeni dijelovi postrojenja ili instalacije niskog napona (strujni krugovi mjerenja i zaštite, istosmjerni strujni krugovi), pa se ta pojava može ispustiti iz razmatranja. Neposredna opasnost gorenja također ne postoji, jer su svi materijali vatrostalni, izuzev ulja u sklopkama i mjernim transformatorima (ako su takve izvedbe upotrebljene). Najveća opasnost postoji ako dođe do izljeva vrućeg ulja iz aparata (temperatura oko 100° C), jer će se tada zbog indirektnog djelovanja luka ulje upaliti. To se neće dogoditi ako ulje ima temperaturu okoline.

Za rasklopno postrojenje bitna su, međutim, dva djelovanja luka: isijavanje topline i povišenje tlaka zbog porasta temperature. Oba djelovanja ovisna su o struji luka, odnosno o struji kratkog spoja, jer se promatra najnepovoljniji slučaj. Snaga luka, definirana kao produkt pada napona u luku i struje luka, jednaka je za luk između kontakata i noževa rastavljača (sl. 9.1a) i kontakata rastavljača međusobno (sl. 9.1b), ako pretpostavimo da su struje luka po apsolutnom iznosu međusobno jednake. Ispitivanja (Lit. 118) pokazuju da kratki spoj prema sl. 9.1a već nakon nekoliko milisekunda prelazi u kratki spoj prema sl. 9.1b. Snaga luka — prema citiranim ispitivanjima — ovisna je o struji kratkog spoja i nazivnom naponu (sl. 9.2), pa se pokazuje da postoji linearna ovisnost između struje kratkog spoja i snage luka.



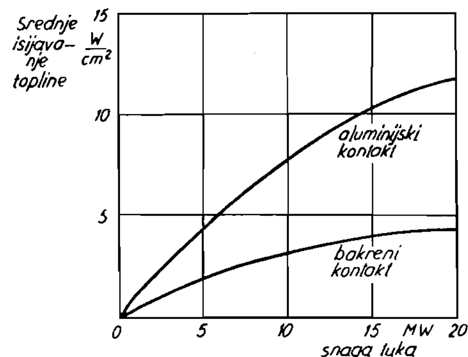
Slika 9.1. Pojava luka među kontaktima i noževima rastavljača

Isijavanje luka raste s povećanjem snage luka, a znatno je ovisno o materijalu kontakata (sl. 9.3). Utjecaj materijala kontakata ukazuje na činjenicu da na toplinu isijavanja utječu i plinovi oko jezgre luka, bilo da apsorbiraju isijavanje bilo da sami u njemu sudjeluju. Zaštita od djelovanja isijavanja može se provesti pregrađivanjem dijela rasklopnog



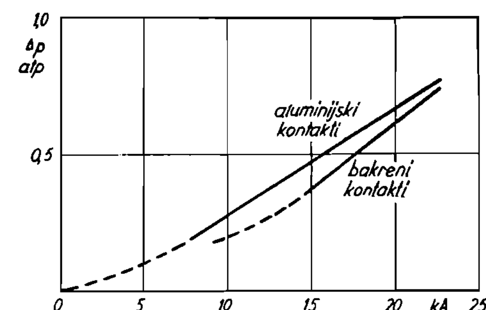
Slika 9.2 Snaga luka (sl. 9.1) u ovisnosti o struji kratkog spoja i o nazivnom naponu

postrojenja u kojemu može nastati luk, od ostalih dijelova rasklopnog postrojenja. Takve pregrade smanjuju preglednost, pa su staklene pregrade kompromisno rješenje, pomoću kojih se može smanjiti djelovanje isijavanja i do polovine.



Slika 9.3. Srednje isijavanje topline na udaljenosti od 1,5 m u ovisnosti o snazi luka

Dio energije luka troši se na ugrijavanje okolnog zraka, što dovodi do povišenja tlaka, koje je to veće, što je struja luka veća (sl. 9.4). To povišenje tlaka dovodi do rušenja pregrada, izvaljivanja vrata i sl. Da se to spriječi, potrebno je predvidjeti otvore za rasterećenje. Efikasnost djelovanja otvora ne ovisi samo o površini otvora, već i o položaju tog otvora

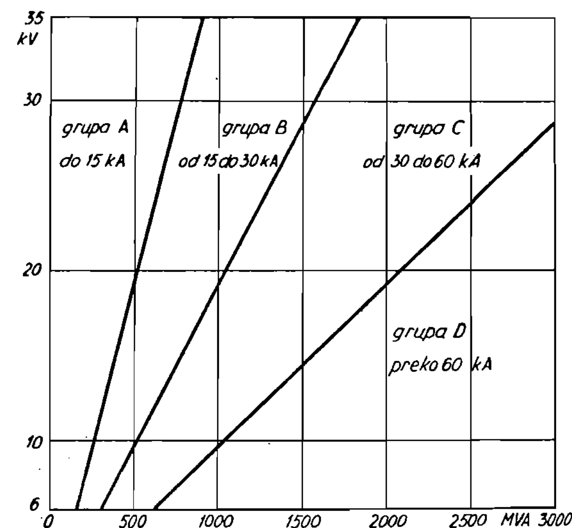


Slika 9.4. Maksimalno povišenje tlaka u ovisnosti o struji luka. Rezultati eksperimenata u zatvorenom kotlu, udaljenost kontakta 10 cm, trajanje luka 20 ms (Lit. 117)

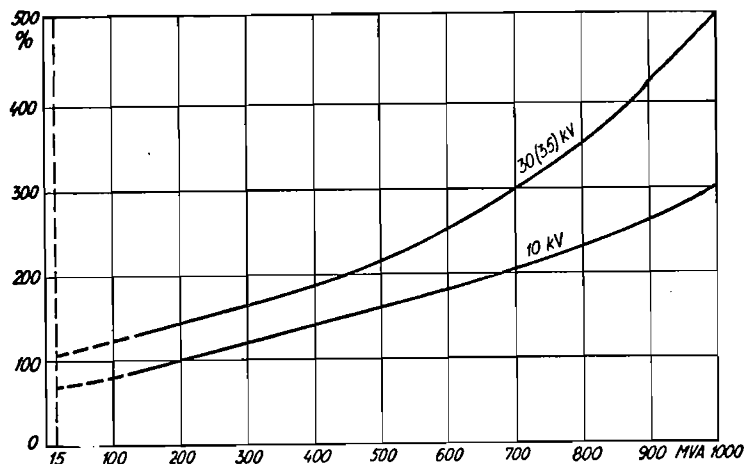
prema mjestu nastanka luka. Ispitivanja na ćelijama s pregradnim zidovima koji mogu izdržati povišenje tlaka od 0,5 at pokazala su (Lit. 117) da se potrebna površina otvora za rasterećenje može odrediti iz izraza

$$F \cong \frac{1}{8} P_l \qquad \ldots (9.1)$$

gdje su F površina u m², a P_l snaga luka u MW. Ako su pregrade veće čvrstoće, koeficijent u (9.1) imat će manju vrijednost.

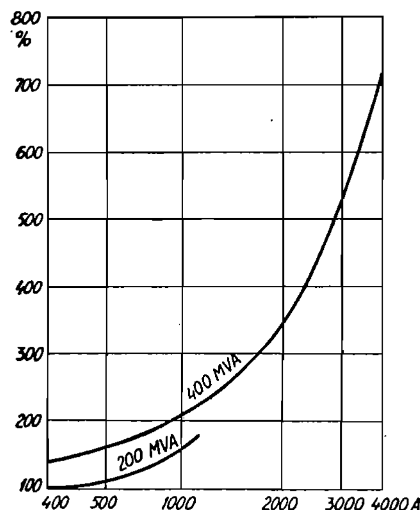


Slika 9.5. Klasifikacija rasklopnih postrojenja prema naponu i snazi kratkog spoja



Slika 9.6. Približna ovisnost troškova izgradnje (bez građevinskog dijela) rasklopnog postrojenja s dvostrukim sabirnicama o rasklopnoj snazi (Lit. 39)

S obzirom na djelovanje luka, koje je ovisno u prvom redu o veličini struje kratkog spoja, mogli bismo (Lit. 117) podijeliti postrojenja u četiri grupe: A — postrojenja male snage, za struje kratkog spoja do 15 kA, B — postrojenja srednje snage, za struje od 15 do 30 kA, C — postrojenja velike snage za struje od 30 do 60 kA, i D — postrojenja vrlo velike snage, za struje kratkog spoja iznad 60 kA. Navedena klasifikacija prema snagama kratkog spoja prikazana je na sl. 9.5.



Slika 9.7. Približna ovisnost troškova izgradnje (bez građevinskog dijela) rasklopnog postrojenja s dvostrukim sabirnicama o nazivnoj struji

Veličina struje kratkog spoja, odnosno snage kratkog spoja, veoma znatno utječe na troškove izgradnje postrojenja, jer o tim veličinama ovisi tip upotrebljenih aparata i izolatora, dimenzija vodiča, tip ćelija i sl.

Na sl. 9.6. nacrtani su dijagrami koji prikazuju približnu ovisnost troškova izgradnje (bez građevinskog dijela) rasklopnog postrojenja s dvostrukim sabirnicama o rasklopnoj snazi. Sa 100% označeni su troškovi izgradnje rasklopnog postrojenja 10 kV, rasklopne snage 200 MVA i s aparatima nazivne struje 400 do 600 A. Troškovi izgradnje za rasklopnu snagu 15 MVA odgovaraju postrojenjima s učinskim rastavljačima i osiguračima.

Na troškove izgradnje znatno utječe i nazivna struja (sl. 9.7), jer su prema njoj dimenzionirani svi vodiči i u aparatima i u rasklopnom postrojenju.

Naravno da i broj sistema sabirnica utječe na troškove izgradnje, s jedne strane zbog povećanja broja aparata, a s druge zbog povećanja građevinskih radova. Za rasklopna postrojenja 10 kV, 200 MVA troškovi izgradnje, u ovisnosti o broju sabirnica, iznose

broj sistema sabirnica	relativni troškovi izgradnje
1	100%
2	108%
3	123%
4	144%

Navedeni podaci služe samo kao ilustracija, jer troškovi izgradnje ovise o načinu izvedbe rasklopnog postrojenja, o odabranom tipu aparata i sl.

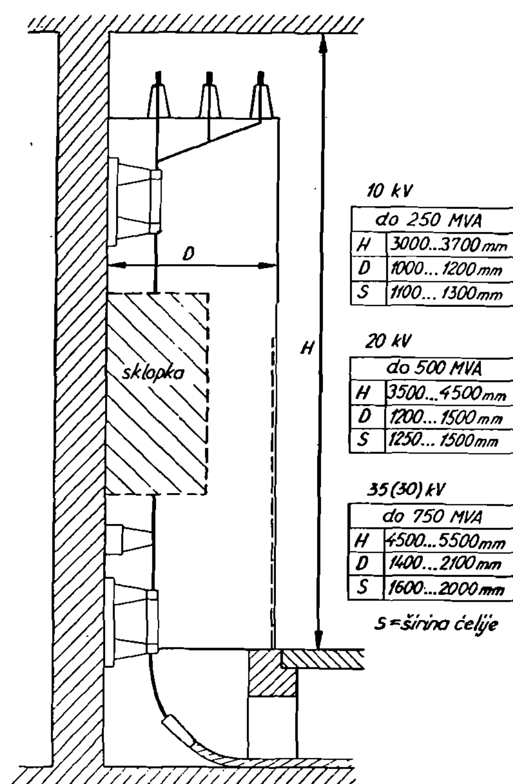
B. Izvedbe s kabelskim odvodom

Veza između rasklopnog postrojenja i vodova najčešće se izvodi kabelom, jer to je s obzirom na izvedbu rasklopnog postrojenja jednostavnije, iako u izvjesnoj mjeri smanjuje sigurnost pogona (kabelske glave!).

Postrojenjima male snage (grupa A) nije potrebna nikakva zaštitna pregrada između rastavljača i sabirnica (sl. 9.8). Za veće struje kratkog spoja (grupa B) korisno je postaviti pregradu između rastavljača i sabirnica (sl. 9.9), da bi se zaštitile sabirnice od djelovanja luka u slučaju otvaranja opterećenih rastavljača. Dimenzije ćelija, a pogotovo njihova širina, ovise o upotrebljenom tipu sklopke. Na skicama rasklopnih postrojenja označeno je mjesto postavljanja sklopke, ne ulazeći u utjecaj tipa sklopke na izvedbu rasklopnog postrojenja.

Na sl. 9.8. i 9.9. izlazni rastavljač i kabelska glava smješteni su u niskom donjem dijelu postrojenja, što se normalno izvodi za postrojenja od 10 kV. Za više napone potrebno je izvesti postrojenje u dva kata, zbog većih dimenzija i sklopke i ostalih aparata. Donji kat izveden je tada kao na sl. 9.10. i 9.11.

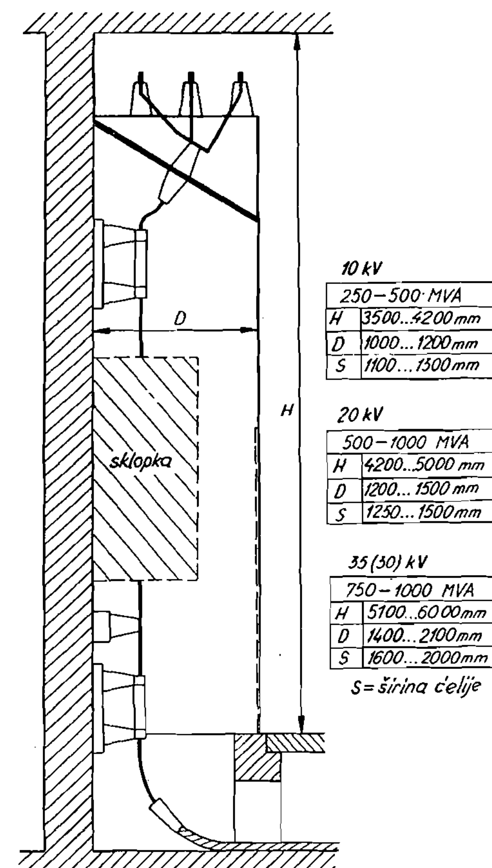
U rasklopnim postrojenjima s jednostrukim sabirnicama najpovoljniji je smještaj uza zid (s jednim hodnikom) zbog smanjenja potrebne izgra-



Slika 9.8. Skica presjeka kroz ćeliju otvorenog rasklopnog postrojenja grupe A s jednostrukim sabirnicama

đene površine. No postavljanjem postrojenja u sredini prostorije ne mijenja se njegova dispozicija. U postrojenjima s dvostrukim sabirnicama potrebno je predvidjeti hodnike s obje strane, kako bi bilo moguće izvršiti pregled i imati uvid u stanje postrojenja, u prvom redu u rastavljača (sl. 9.10) za oba sistema sabirnica.

Na sl. 9.10. prikazan je presjek kroz ćeliju postrojenja grupe B s dvostrukim sabirnicama. Ako se radi o manjim strujama kratkog spoja (grupa A), postrojenje se izvodi analogno izvedbi na sl. 9.8. Za postrojenje grupe C upotrebljava se izvedba sa sl. 9.11. dakle ona sa dvije pregrade (između prostora za sklopku i sabirničkih rastavljača, te između sabirničkih rastavljača i sabirnica). Pri većim strujama, naime, elektrodinamičko djelovanje prevladava termički uzgon (Lit. 121), pa u slučaju napajanja sa strane sabirnica luk putuje od rastavljača prema sklopki. Sabirnice su postavljene jedna iznad druge, da bi se uz uspravan položaj postigao veći moment otpora. Visina prostora za smještaj sabirnica oda-



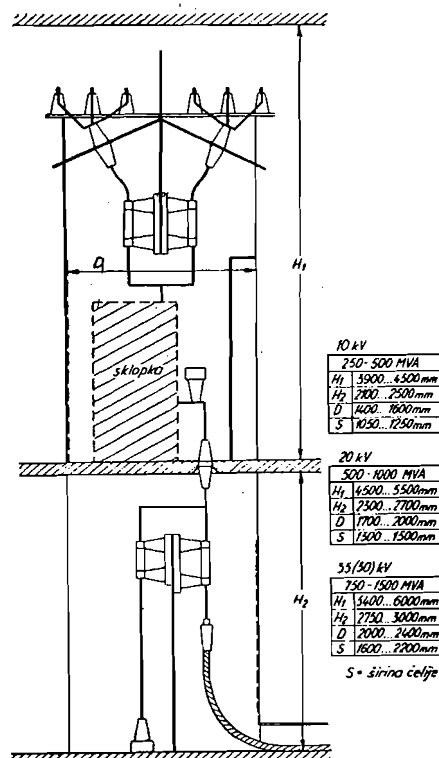
Slika 9.9. Skica presjeka kroz ćeliju otvorenog rasklopnog postrojenja grupe B s jednostrukim sabirnicama

bire se tolika da je moguće bez poteškoća izvesti čišćenje i pregled sabirnica.

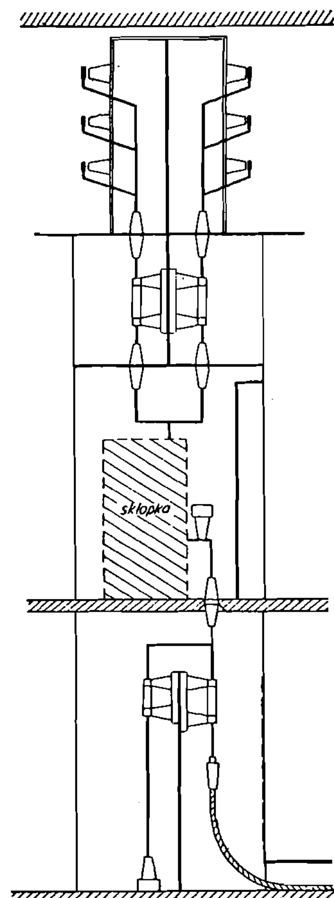
Da bi se provelo dalje ograničenje djelovanja luka, mogu se uzduž sabirnica postaviti pregrade, uz upotrebu provodnih izolatora.

Naravno da je moguće i na nešto drukčiji način izvesti otvorena postrojenja srednjeg napona, ali u principu uvijek se dolazi do istih rješenja.

Potreba za izgradnjom postrojenja grupe D javlja se vrlo rijetko (snaga kratkog spoja iznad 1000 MVA, za napon 10 kV). Tada su potrebne specijalne konstrukcije, i treba voditi računa o opasnostima od luka i o silama među vodičima.



Slika 9.10. Skica presjeka kroz ćeliju otvorenog rasklopnog postrojenja grupe B s dvostrukim sabirnicama



Slika 9.11. Skica presjeka kroz ćeliju otvorenog rasklopnog postrojenja grupe C s dvostrukim sabirnicama

C. Izvedbe s neizoliranim odvodom

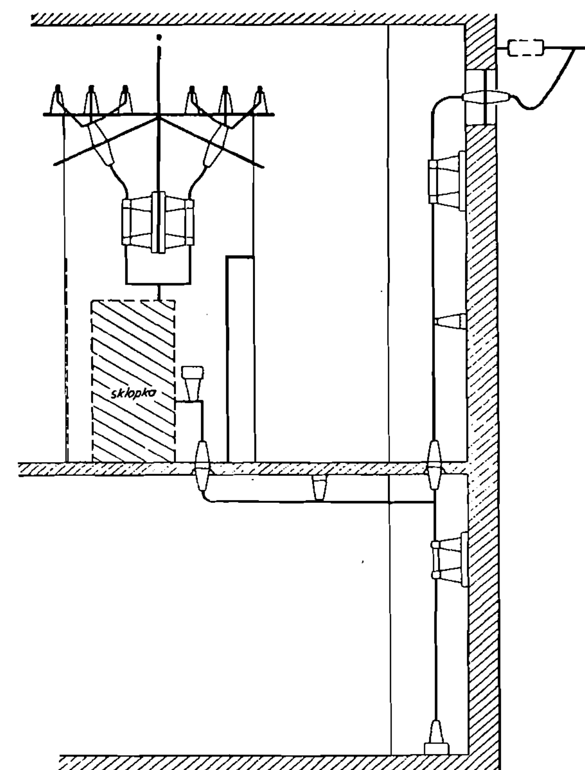
Većina postrojenja izvodi se s kabelskim odvodima, bez obzira da li se radi o zračnim ili kabelskim vodovima, jer takva izvedba traži manju izgrađenu površinu rasklopnog postrojenja. Ipak u nekim slučajevima, kad se radi o priključku zračnih vodova, a želi se izbjeći kabel (povećana sigurnost, lakši nadzor), izvode se postrojenja s neizoliranim odvodima. Neizolirani odvod mora, da bi se održala potrebna visina iznad terena na izlazu iz rasklopnog postrojenja, izići na gornjem dijelu zgrade.

Postavljanjem sabirnica u najgornji dio postrojenja, kao u postrojenjima s kabelskim odvodom, pojavljuje se potreba izvedbe posebne ćelije smještene uz vanjski zid, za priključak zračnog voda (sl. 9.12). Izvedba na sl. 9.10. omogućuje odvod na obje strane rasklopnog postrojenja.

Analogno izvedbi s dvostrukim sabirnicama, izvodi se i rasklopno postrojenje s jednostrukim sabirnicama.

U nekim slučajevima može se izvesti postrojenje manje visine, ako se smanji visina donjeg kata na račun pristupačnosti i mogućnosti nadzora tog dijela postrojenja.

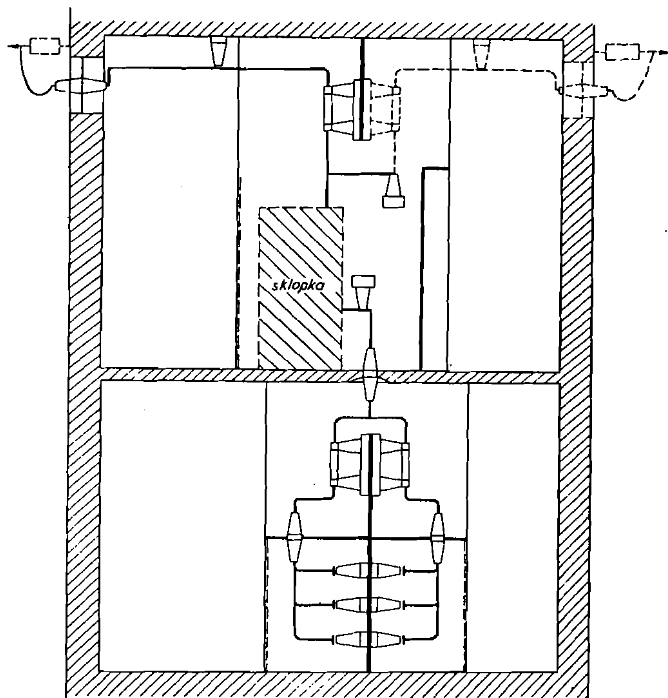
Rješenje sa smještajem sabirnica u najvišem dijelu postrojenja u potpunosti odgovara kabelskom odvodu, jer ima kratke i ravne spojne vodove. Izvedba s neizoliranim odvodima, a s istim smještajem sabirnica dovodi međutim, do dugih spojnih vodova zbog neophodne promjene smjera. Postavljanjem sabirnica u najniži dio rasklopnog postrojenja dolazi se — za izvedbu s neizoliranim odvodima — do kratkih i ravnih spojnih vodova,



Slika 9.12. Skica presjeka kroz ćelije otvorenog rasklopnog postrojenja grupe B s dvostrukim sabirnicama i s neizoliranim odvodom

jer tada, s obzirom na međusobni položaj sabirnica i odvoda, imamo istu situaciju kao za sabirnice i kabelske odvode postavljene gore.

Presjek kroz ćelije postrojenja sa sabirnicama postavljenim dolje prikazan je na sl. 9.13. Mana je takve izvedbe što ne postoji mogućnost neposredne kontrole stanja sabirničkih rastavljača iz istih hodnika iz kojih je moguć nadzor nad sklopkama. U rasklopnim postrojenjima na sl. 9.8. do 9.12. takva je kontrola moguća.



Slika 9.13. Skica presjeka kroz ćelije otvorenog rasklopnog postrojenja s dvostrukim sabirnicama smještenim u donjem dijelu postrojenja i s neizoliranim vodovima.

Postrojenje sa sabirnicama postavljenim dolje moguće je izvesti i s jednostrukim sabirnicama. U tom slučaju mogu se potporni izolatori sabirnica postaviti na pod. Ako je tada potreban izlaz vodova samo na jednu stranu cijelo postrojenje se može smjestiti uza zid, dok je veza sa zračnim vodom smještena iznad hodnika.

Izvedba prema sl. 9.13, u usporedbi s onom prema sl. 9.12, ima manji tlocrt i manji volumen zgrade (Lit. 122).

9.3. OKLOPLJENE IZVEDBE RASKLOPNIH POSTROJENJA SREDNJEG NAPONA (DO UKLJUČIVO 35 kV)

A. Općenito

Rasklopna postrojenja oklopljena limom imaju, u usporedbi s otvorenim postrojenjima, niz prednosti: manju potrebnu površinu, dobru zaštitu od dodira i prašine, lagano proširenje i premještanje cijelog postrojenja, brzu i jednostavnu montažu, mogućnost postavljanja i u prostorijama koje su pristupačne i nekvalificiranom osoblju.

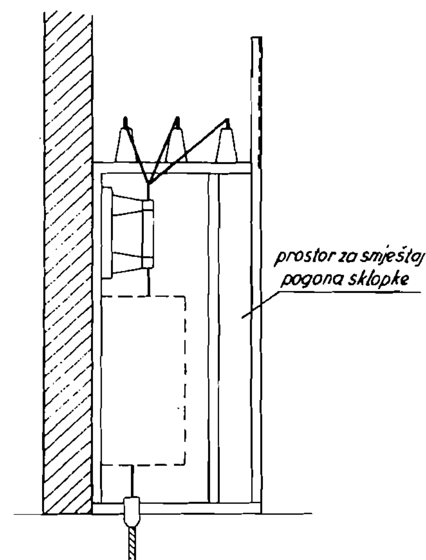
Uklopljena postrojenja izvode se za snage kratkog spoja koje odgovaraju grupama A i B (sl. 9.5).

S obzirom na mjesto postavljanja, razlikujemo unutarnja i vanjska oklopljena postrojenja. Prva se postavljaju u zgradama, a druga na slobodnom. Među sobom se razlikuju jedino prema izvedbi oklopa (zaštita od atmosferskih utjecaja).

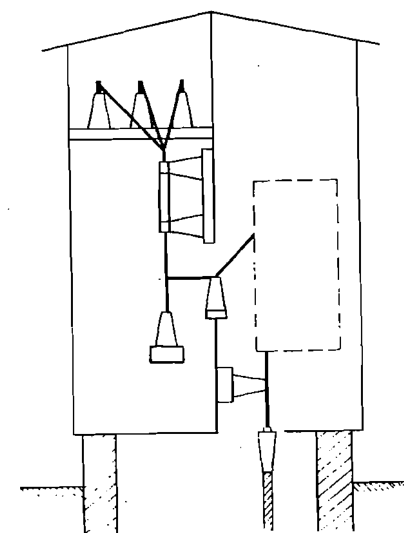
Izvode se dva tipa oklopljenih postrojenja: s nepomično montiranim aparatima i s pokretnim aparatima. Prvi tip se u principu ne razlikuje od otvorenih izvedaba, dok se drugi tip može karakterizirati kao postrojenje bez rastavljača.

B. Izvedba s nepomično montiranim aparatima

Kako je već spomenuto, izvedbe s nepomično montiranim aparatima ne razlikuju se u principu od otvorenih rasklopnih postrojenja (sl. 9.14).

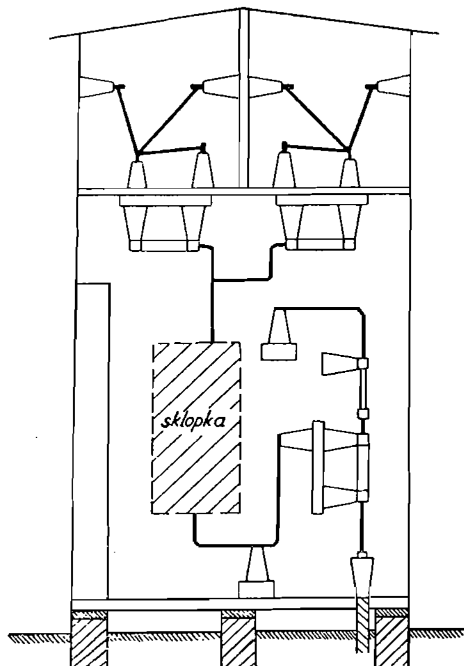


Slika 9.14. Skica presjeka kroz ćeliju unutarnjeg oklopljenog postrojenja s nepomično montiranim aparatima



Slika 9.15. Skica presjeka kroz ćeliju oklopljenog postrojenja za postavljanje na slobodnom s nepomično montiranim aparatima

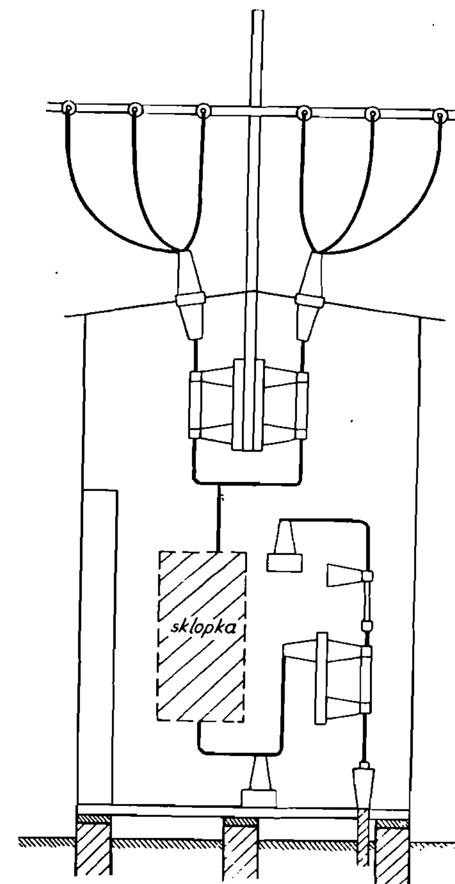
Osnovna je razlika prema otvorenoj izvedbi ta, što su svi aparati montirani u tvornici, pa je na mjestu ugradnje potrebno izvesti samo priključke. Skelet ćelije izrađen je od limenih profila, dok su stranice od dekapiranog lima. Ćelije su obično predviđene za montažu uza zid i sa stražnje strane su otvorene, dok su na prednjoj strani vrata. Ćelije se izvode otvorene odozgo. U prašnim prostorijama stavljaju se ćelije oklopljene sa svih strana.



Slika 9.16. Skica presjeka kroz ćeliju oklopljenog postrojenja s dvostrukim sabirnicama za postavljanje na slobodnom s nepomično montiranim aparatima

Izvedbe s nepomično montiranim aparatima naišle su kao vanjska rasklopna postrojenja na znatnu primjenu. Obično se ćelije takvih postrojenja izvode s dvokrilnim vratima iza kojih se nalazi lim koji se može podignuti i prisloniti na otvorena vrata. Podizanjem lima dobiva se pokriveno radno mjesto, koje omogućuje revizione i remontne radove i u slučaju lošeg vremena.

Ćelije su izvedene na istom principu kao i one unutarnjeg postrojenja, s tom razlikom što je moguć pristup s obje strane, pa to dovodi do dvostrukih ćelija, koje se mogu upotrijebiti ili za dva odvoda s jednostavnijom opremom (npr. za dva odvoda s učinskim rastavljačima) ili za jedan odvod sa sklopkom (sl. 9.15). Takva ćelija upotrebljava se i za smještaj transformatora.



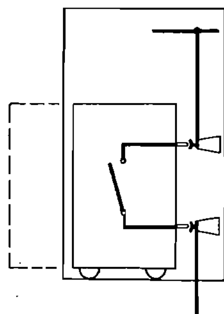
Slika 9.17. Skica presjeka kroz ćeliju oklopljenog postrojenja za postavljanje na slobodnom s dvostrukim sabirnicama iznad ćelije s nepomično montiranim aparatima

I postrojenje s dvostrukim sabirnicama može se izvesti oklopljeno. Sabirnice mogu biti smještene ili unutar ćelije (sl. 9.16) ili na slobodnom (sl. 9.17). Izvedba na sl. 9.17. dolazi najčešće u obzir za napone 30 ili 35 kV.

C. Izvedba s pomičnim aparatima

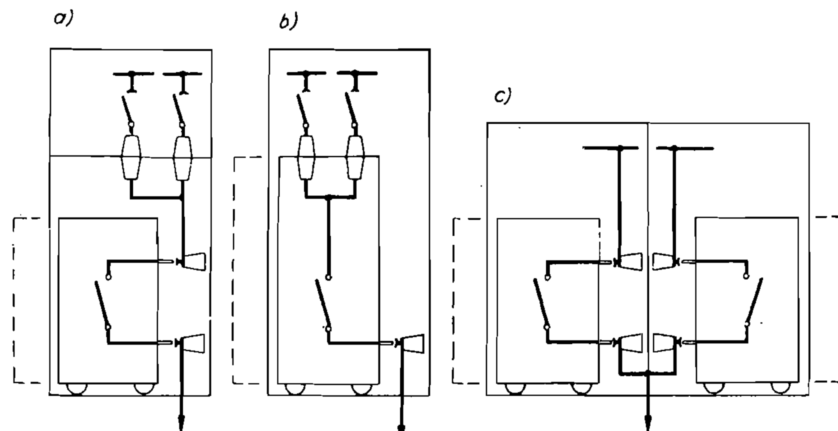
Izvedba s pomičnim aparatima primjenjuje se sve više, jer omogućuje konstrukciju bez rastavljača, čime se smanjuju dimenzije ćelija.

Na sl. 9.18. shematski je prikazana izvedba s jednostrukim, a na sl. 9.19. s dvostrukim sabirnicama. U svim slučajevima prekidanje strujnog kruga vrši se sklopkom, nakon čega je deblokiran uređaj za izvlačenje sklopke. Izvlačenjem sklopke, što se vrši ručno ili pomoću motora, i vidljivo se prekida strujni krug. Sklopka dakle preuzima i ulogu rastavljača. Izvedbe s dvostrukim sabirnicama sa sl. 9.19a i 9.19b ne razlikuju se u principu



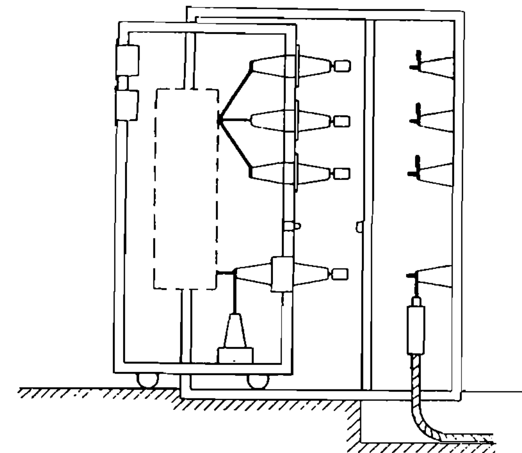
Slika 9.18. Shematski prikaz izvedbe ćelije postrojenja s pomičnim aparatima s jednostrukim sabirnicama

od postrojenja s nepomično montiranim aparatima jer imaju sabirničke rastavljače, pa je tada izvučena sklopka dodatni rastavljač, koja samo preuzima ulogu izlaznog rastavljača. U izvedbi sa sl. 9.19a izvlači se samo sklopka, a u onoj sa sl. 9.19b sklopka i noževi sabirničkih rastavljača. Sastavljanjem dviju ćelija prikazanih na sl. 9.18. dolazi se do izvedbe s dvostrukim sabirnicama sa po dvije sklopke po odvodu, što odgovara shemi na sl. 5.11. U postrojenjima s pomičnim aparatima, međutim, može se ostvariti izvedba sa po dvije sklopke po odvodu s manjim brojem sklopaka nego u postrojenjima s nepomično montiranim aparatima, gdje je potrebno $2n$ sklopaka, ako sa n označimo broj odvoda. U postrojenju s pomičnim aparatima potrebno je $n + 2$ sklopaka, od kojih jedna služi



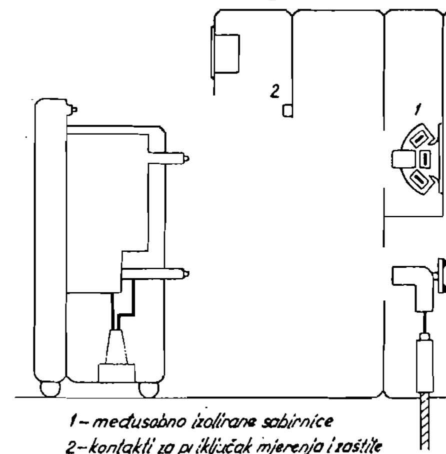
Slika 9.19. Shematski prikaz izvedaba ćelija postrojenja s pomičnim aparatima s dvostrukim sabirnicama

za prespajanja s jednih sabirnica na druge, a druga kao rezerva za slučaj kvara na jednoj od sklopaka. Normalno je dakle na jednom odvodu stalno priključena jedna sklopka, već prema tome na koje je sabirnice priključen odvod.



Slika 9.20. Skica presjeka ćelije oklopljenog postrojenja s pomičnim aparatima i s normalnom izvedbom sklopke

U principu razlikujemo dva tipa izvedaba s pomičnim aparatima: sa sklopkama normalne konstrukcije (sl. 9.20) i sa sklopkama čija je konstrukcija prilagođena izvedbi s pomičnim aparatima (sl. 9.21). Osim toga razlikuju se prema izvedbi sabirnica: gole neizolirane sabirnice (sl. 9.20)



Slika 9.21. Skica presjeka ćelije oklopljenog postrojenja s pomičnim aparatima i posebnom izvedbom sklopke

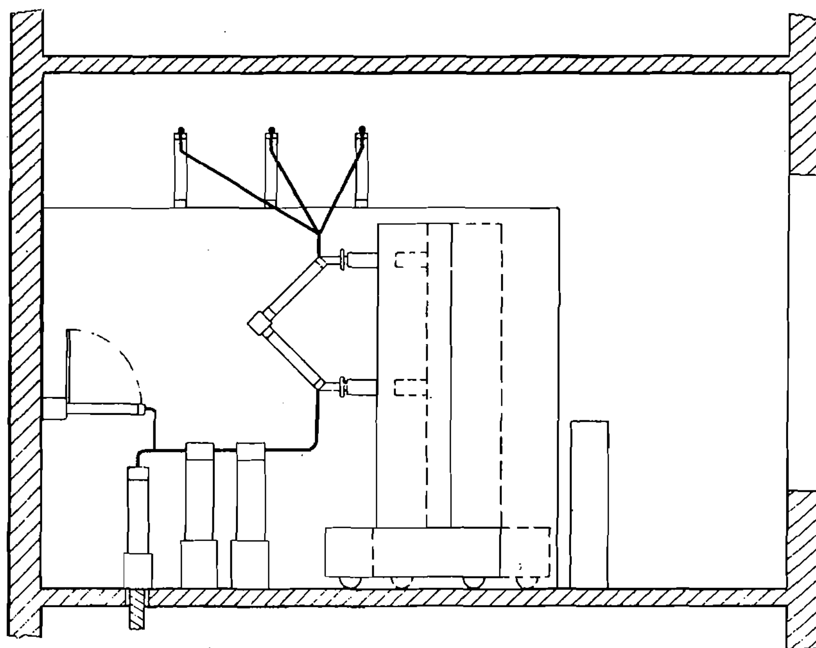
i međusobno izolirane sabirnice (sl. 9.21). Naravno da se izrađuju rasklopna postrojenja i s neizoliranim sabirnicama i sa specijalno konstruiranom sklopkom. Danas se proizvode i takve ćelije u kojima su svi dijelovi izolirani, pa ne postoje goli vodiči među kojima bi mogao nastati luk. Takva se postrojenja osim toga izvode bez oklopa, što dolazi u obzir za postavljanje u zatvorene prostorije u koje je dopušten pristup samo pogonskom osoblju.

9.4. IZVEDBE RASKLOPNIH POSTROJENJA VISOKOG I NAJVIŠEG NAPONA (IZNAD 35 kV)

A. Rasklopna postrojenja u zgradi

Rasklopna postrojenja napona 60 kV i više smještavaju se u zgrade samo iznimno, kad ne postoji mogućnost izvedbe na otvorenom (smještaj unutar naseljenog područja, u području s mnogo prašine u zraku, unutar industrijskih postrojenja i sl.).

Rasklopno postrojenje visokog i najvišeg napona može se izvesti analogno rasklopnom postrojenju srednjeg napona, prikazanom na sl. 9.10. i sl. 9.12, s tom razlikom što se u postrojenja nazivnog napona iznad 35 kV



Slika 9.22. Izvedba rasklopnog postrojenja 110 kV u zgradi s pomičnom sklopkom

ne postavljaju pregrade, jer je opasnost od luka malena zbog relativno malih struja i pri najvećim snagama kratkog spoja.

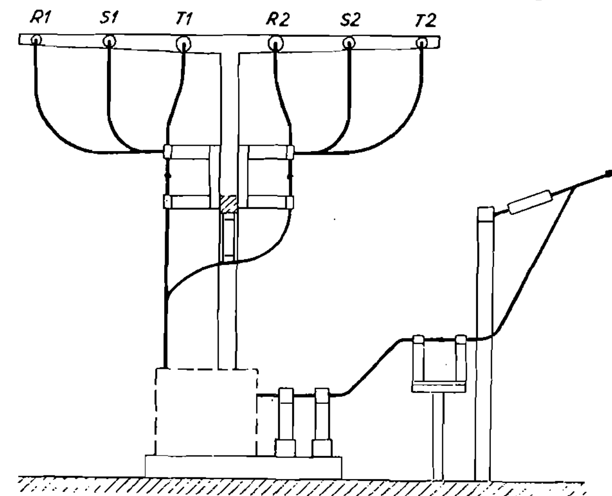
U posljednje vrijeme izrađuju neke tvornice sklopke od 110 kV, čija konstrukcija omogućuje izvedbu i postrojenja toga napona s pomičnim aparatima (sl. 9.22). Takvoj izvedbi treba za trećinu manji izgrađeni volumen zgrade. Posebno konstruirane sklopke omogućuju i izvedbu postrojenja s dvostrukim sabirnicama a sa dvije sklopke po odvodu (sl. 9.19c), sa svim prednostima takve dispozicije kako je to navedeno u poglavlju o oklopljenim postrojenjima.

B. Rasklopna postrojenja na slobodnom

Razvijeno je prilično mnogo izvedaba rasklopnih postrojenja najviših napona, s težnjom da se smanje potrebne investicije, poboljšaju pogonska svojstva, te da se omogući njihova upotreba i za posebne zahtjeve (izvedba trostrukih sabirnica, U-sabirnica, spojnog polja i sl.).

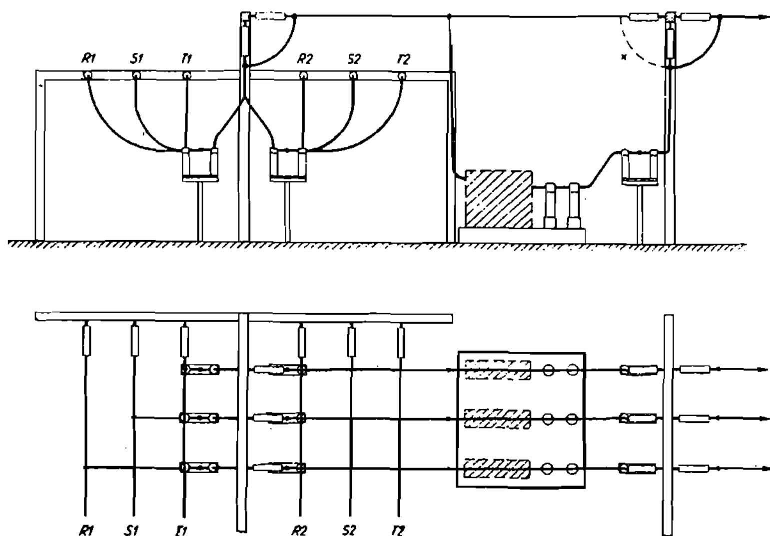
Izvedba na sl. 9.23, koja se obično naziva visokom izvedbom, kopija je postrojenja srednjeg napona. Primjenjuje se samo kad je raspoloživa površina terena znatno ograničena (uz hidroelektrane u uskim dolinama i sl.), jer je težak pristup k sabirnicama i rastavljačima i jer su potrebne relativno velike investicije za izvedbu visokog stupa s konzolama.

Na sl. 9.24. prikazana je izvedba sa srednjim stupom, u kojoj se spojni vod k sklopki vodi iznad sabirnica, za što su potrebni visoki portali. Zbog visine srednjeg portala izvedba sa srednjim stupom nije podesna

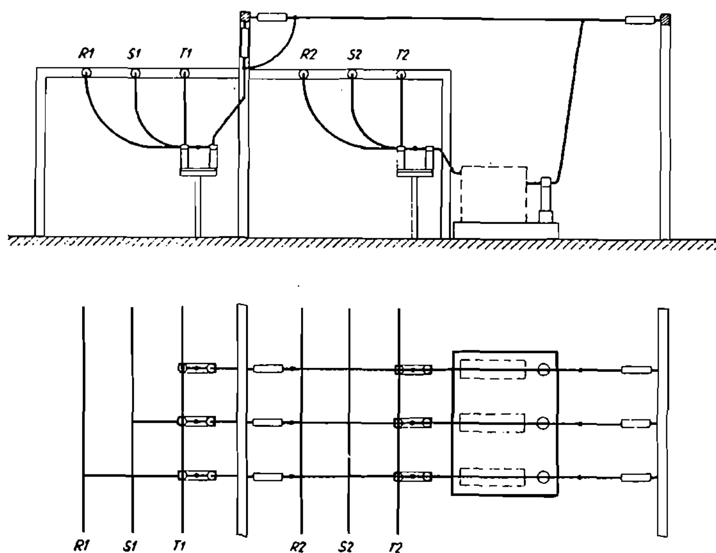


Slika 9.23. Visoka izvedba rasklopnog postrojenja najviših napona

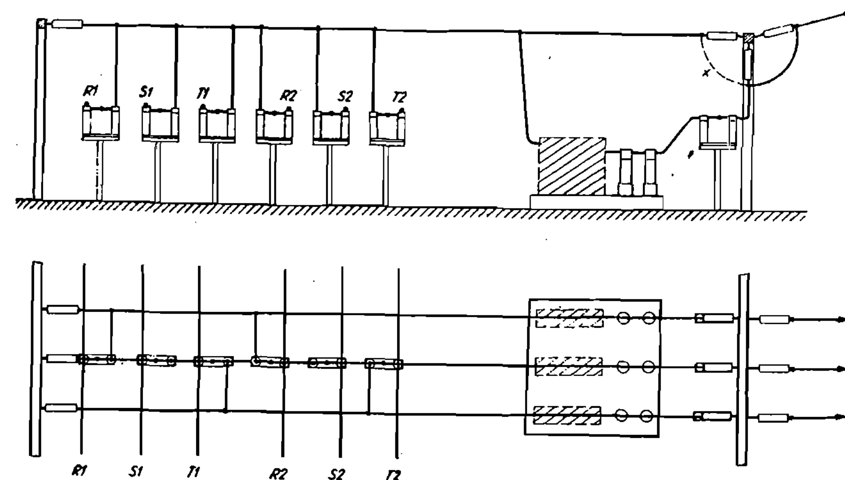
za postrojenje 220 kV. Nasuprot tome ni poprečnoj (tandem) izvedbi (sl. 9.26), jer su rastavljači — u tlocrtu — okomito postavljeni na sabirnice, kao ni uzdužnoj izvedbi (izvedba u brazdi) (sl. 9.29), jer su rastavljači



Slika 9.24. Izvedba sa srednjim stupom rasklopnog postrojenja najviših napona (x spoj za premoštenje sklopke)



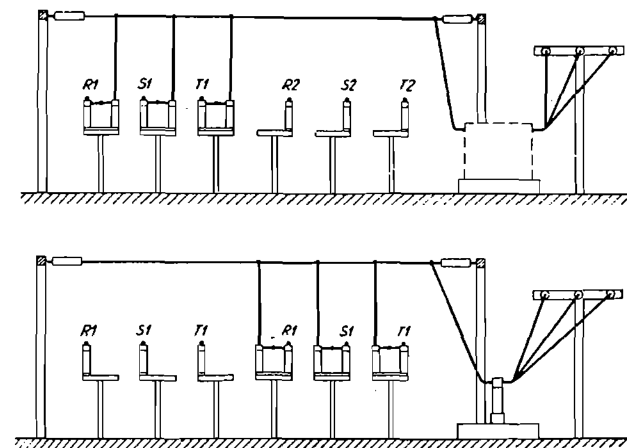
Slika 9.25. Spojno polje rasklopnog postrojenja sa srednjim stupom



Slika 9.26. Poprečna (tandem) izvedba rasklopnog postrojenja najviših napona (x spoj za premoštenje sklopke)

paralelni sa sabirnicama, nisu potrebni visoki stupovi. U prvom slučaju sabirnice su postavljene na jedan od izolatora sabirničkih rastavljača (sl. 9.26), dok su u uzdužnoj izvedbi sabirnice zavješene na portalima (sl. 9.29), kao i u izvedbi sa srednjim stupom.

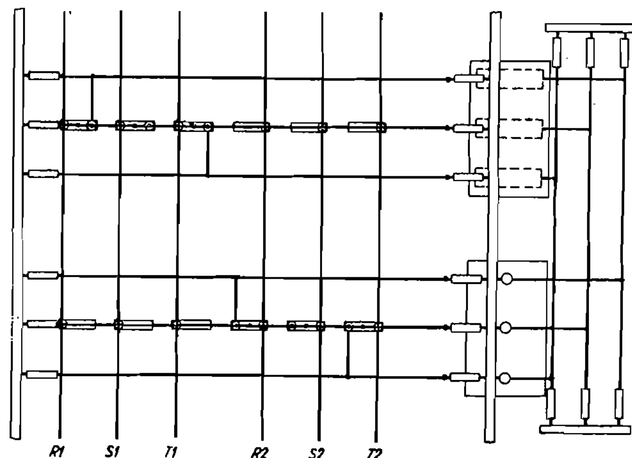
Kao što je spomenuto u petom poglavlju (sl. 5.20), u slučaju zamjene sklopke u jednom odvodu sklopkom spojnog polja, potrebno je premostiti sklopku odvoda. To je jednostavno u izvedbi sa srednjim stupom i u



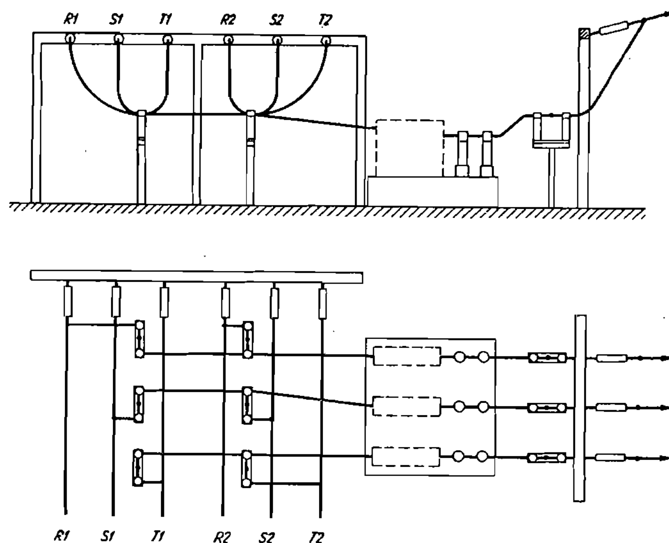
Slika 9.27. Nacrt spojnog polja rasklopnog postrojenja u poprečnoj (tandem) izvedbi

poprečnoj izvedbi (uže x na sl. 9.24. i 9.26), dok se u uzdužnoj izvedbi to ne može ostvariti a da se ne demontira sklopka.

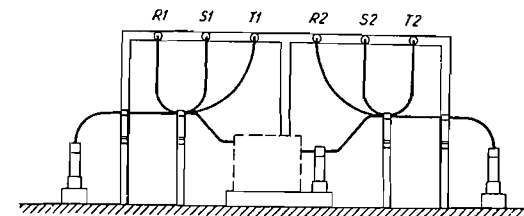
S obzirom na pogonsku sigurnost može se smatrati da je najsigurnija uzdužna izvedba (sl. 9.29), jer iznad sabirnica nema nikakvih vodova. U

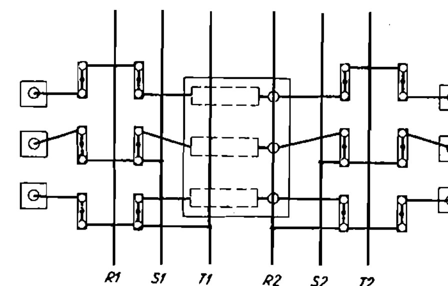


Slika 9.28. Tlocrt spojnog polja rasklopnog postrojenja u poprečnoj (tandem) izvedbi



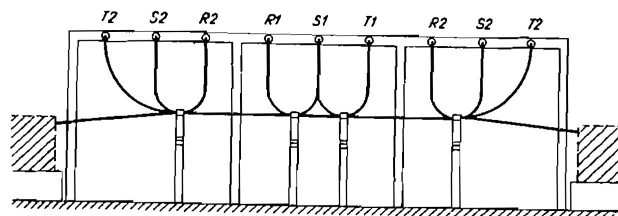
Slika 9.29. Uzdužna (u brazdi) izvedba rasklopnog postrojenja najviših napona

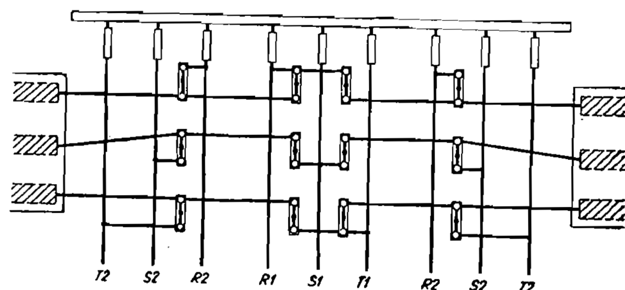




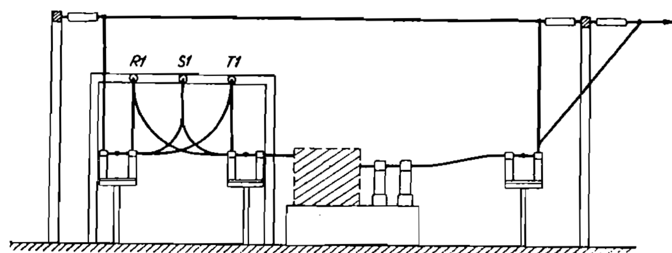
Slika 9.30. Spojno i mjerno polje rasklopnog postrojenja u uzdužnoj izvedbi (izvedba u brazdi).

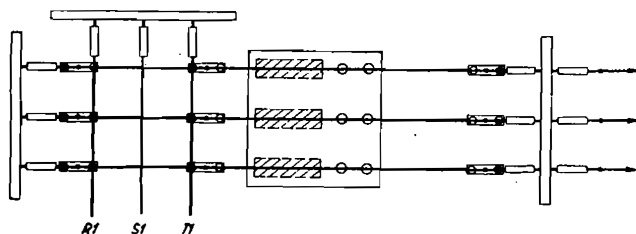
Slika 9.31. Postrojenje s U-sabirnicama u izvedbi sa srednjim stupom (sklopke i izlazni rastavljači kao na sl. 9.24)



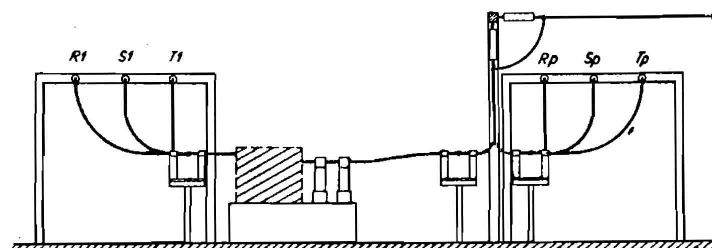


Slika 9.32. Postrojenje s U-sabirnicama u uzdužnoj izvedbi (sklopke i izlazni rastavljači kao na sl. 9.29)



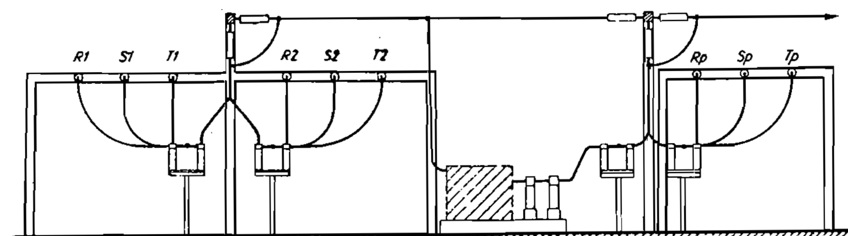


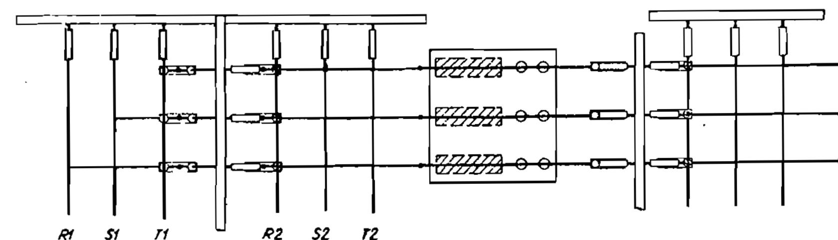
Slika 9.33. Izvedba sa srednjim stupom rasklopnog postrojenja s jednostrukim sabirnicama i s obilaznim spojem (prema shemi na sl. 5.8)



R1 S1 T1 Rp Sp Tp

Slika 9.34. Izvedba sa srednjim stupom rasklopnog postrojenja s jednostrukim i pomoćnim sabirnicama (prema shemi na sl. 5.15)





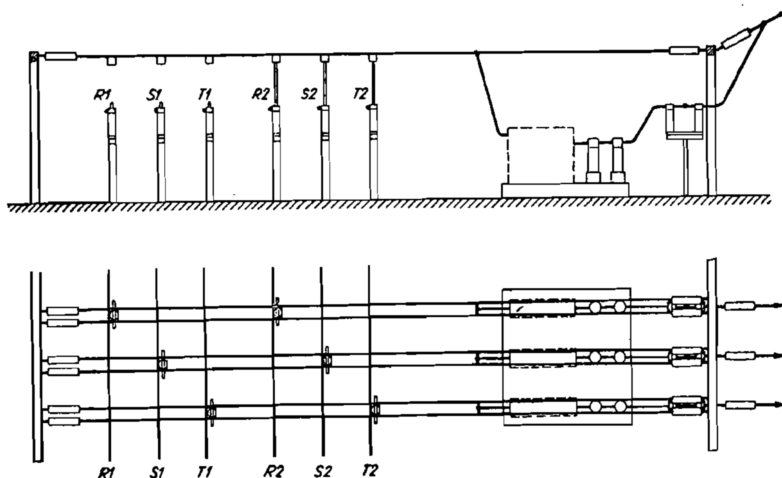
Slika 9.35. Izvedba sa srednjim stupom rasklopnog postrojenja s dvostrukim i pomoćnim sabirnicama (prema shemi na sl. 5.16)

rasklopnom postrojenju sa srednjim stupom, naime, postoje vodovi samo iznad jednog, a u poprečnoj izvedbi iznad oba sistema sabirnica.

U već prikazanim rasklopnim postrojenjima nisu ucrtani aparati na početku voda, a na izlazu iz rasklopnog postrojenja. U svim slučajevima potrebno je predvidjeti odvodnike prenapona, koji se montiraju na postolja. Na isti način postavljaju se visokofrekventni kondenzatori, dok su visokofrekventne prigušnice zavješene na izlazni portal.

Spojno polje u rasklopnim postrojenjima sa srednjim stupom (sl. 9.25) i u uzdužnoj izvedbi (sl. 9.30) traži samo jedno polje po duljini postrojenja. Nasuprot tome poprečna izvedba (sl. 9.27. i 9.28) zahtijeva dva polja za smještaj spojnog polja. U spojno polje rasklopnog postrojenja uzdužne izvedbe mogu se, osim toga, smjestiti i naponski transformatori mjernog polja, spojeni preko rastavljača.

Postavljanjem U-sabirnica (sl. 5.14b) omogućuje se odlazak vodova s obje strane rasklopnog postrojenja. U-sabirnice moguće je izvesti u postrojenju sa srednjim stupom (sl. 9.31), kao i u postrojenju uzdužne izvedbe

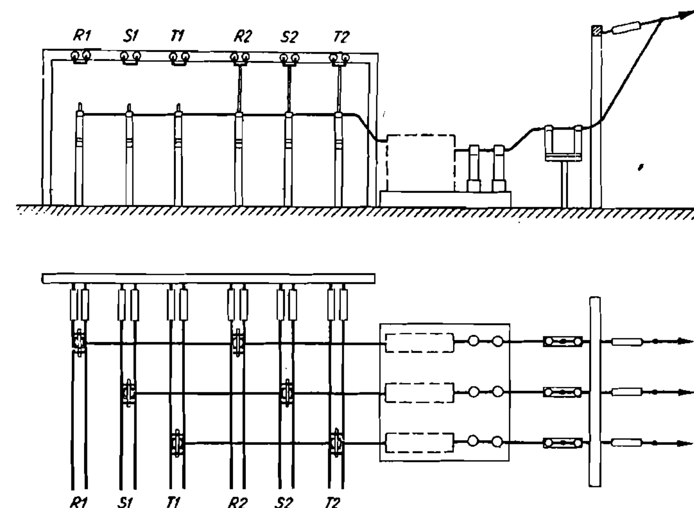


Slika 9.36. Izvedba rasklopnog postrojenja s rastavljačima na jednom izolatoru i sabirnicama postavljenim dolje

(sl. 9.32). Postrojenje sa U-sabirnicama u poprečnoj izvedbi nije moguće izvesti. Postrojenju sa U-sabirnicama potrebno je jedno polje normalne širine za spoj vanjskih sabirnica.

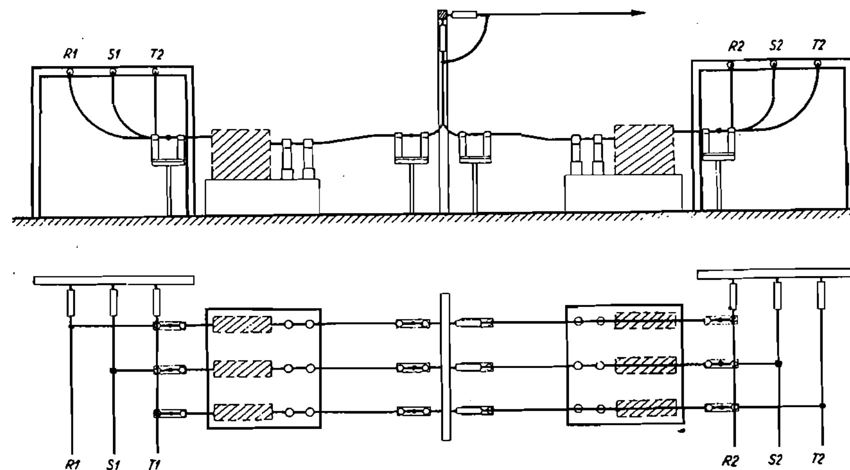
Postrojenje s jednostrukim sabirnicama jednostavnije je i može se izgraditi u sve tri opisane izvedbe. Način izgradnje lako je ustanoviti iz prikaza postrojenja s dvostrukim sabirnicama.

Rasklopno postrojenje s jednostrukim sabirnicama i premoštenjem sklopke (shema prema sl. 5.8) može se izgraditi prema sl. 9.33. Prikazana je izvedba sa srednjim stupom. Za takvu shemu spoja nije pogodna uzdužna, a pogotovo ne poprečna izvedba.

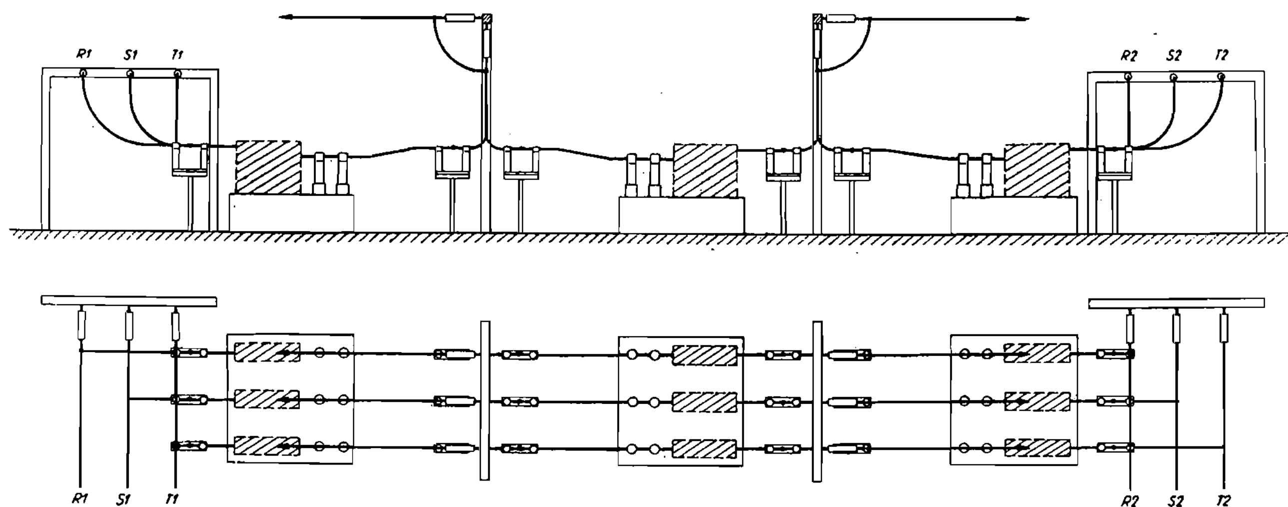


Slika 9.37. Izvedba rasklopnog postrojenja s dvostrukim sabirnicama s rastavljačima na jednom izolatoru i sabirnicama postavljenim gore

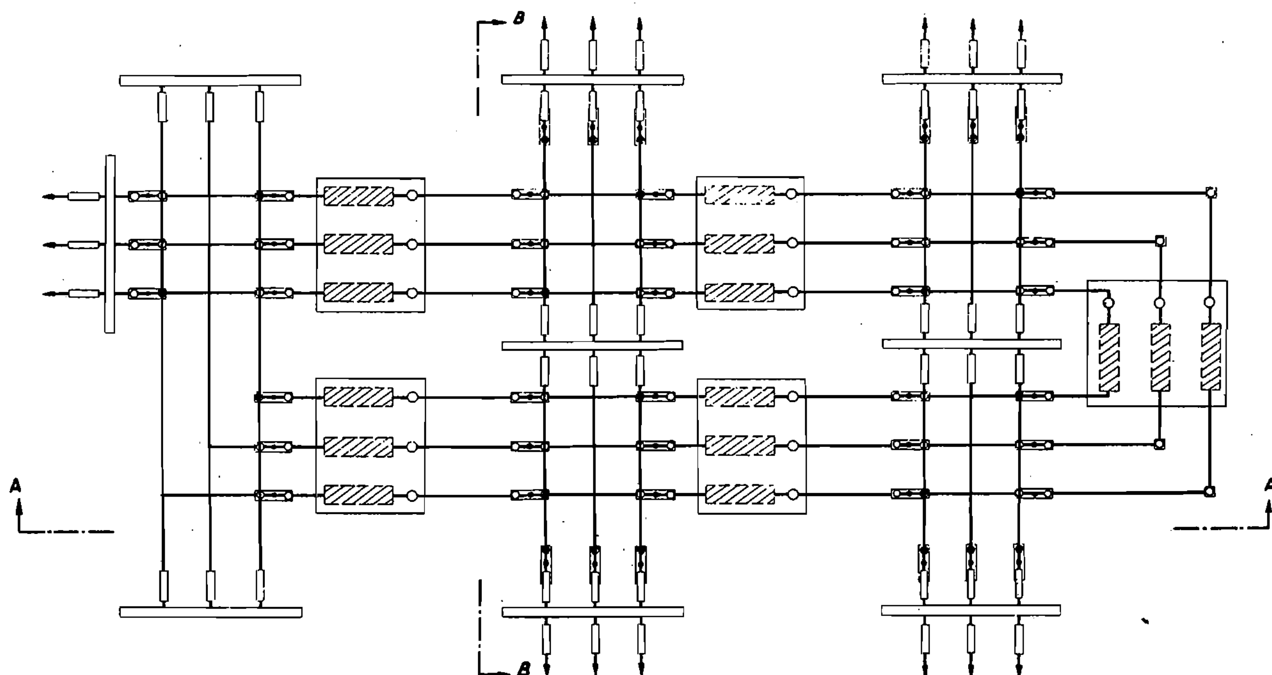
Na sl. 9.34. prikazano je rasklopno postrojenje s jednostrukim i pomoćnim sabirnicama, a na sl. 9.35. s dvostrukim i pomoćnim sabirnicama. Oba postrojenja izvedena su sa srednjim stupom. Analogno se može izgraditi postrojenje uzdužne izvedbe, dok je poprečna izvedba nepogodna za postrojenje s pomoćnim sabirnicama.



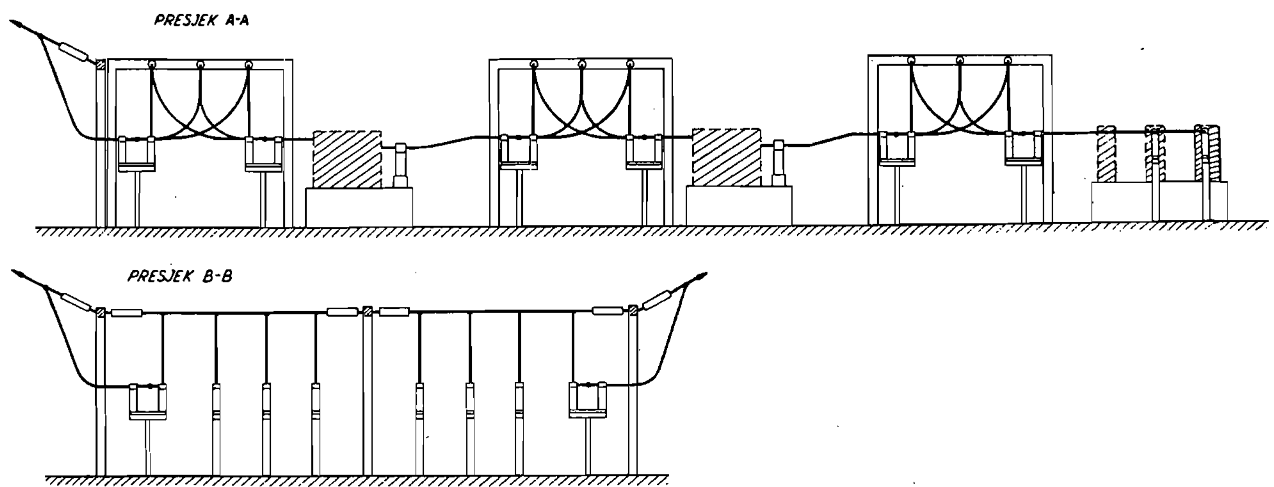
Slika 9.38. Izvedba sa srednjim stupom rasklopnog postrojenja s dvije sklopke po odvodu (prema shemi na sl. 5.11)



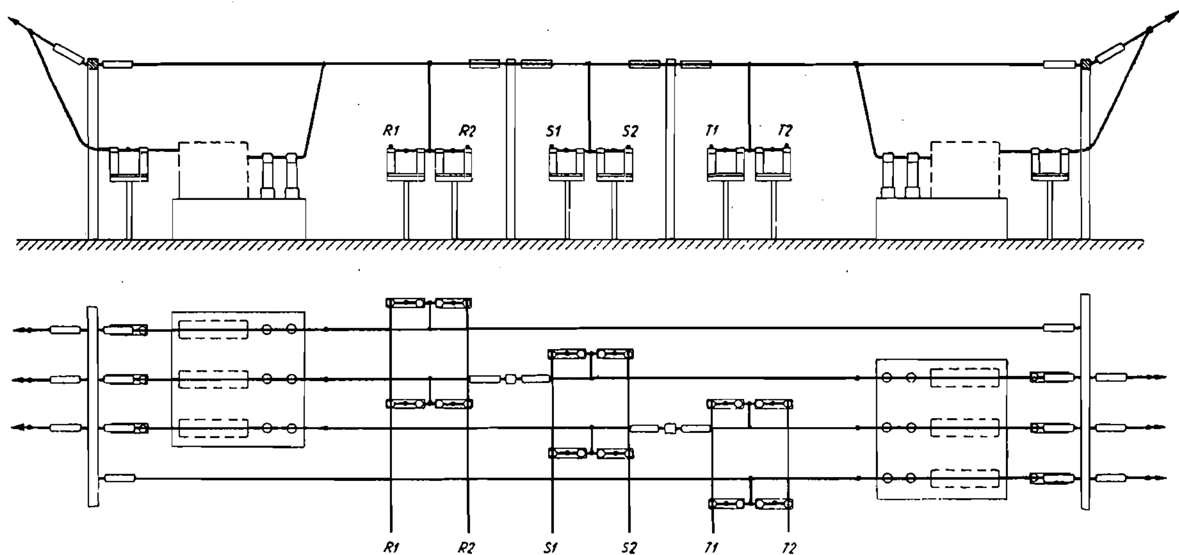
Slika 9.39. Izvedba sa srednjim stupom rasklopnog postrojenja s tri sklopke za dva odvoda (prema shemi na sl. 5.13)



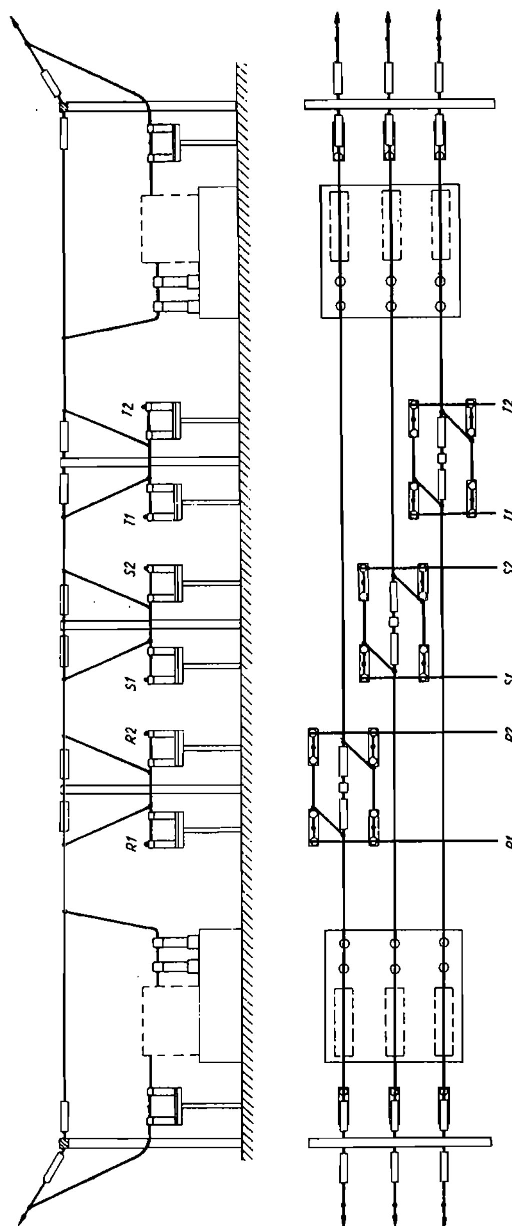
Slika 9.40. Tlocrt rasklopnog postrojenja izvedenog prema shemi na sl. 5.17.



Slika 9.41. Presjeci rasklopnog postrojenja na sl. 9.40.



Slika 9.42. Postrojenje s miješanim fazama, nasuprotna polja pomaknuta za razmak sabirnica



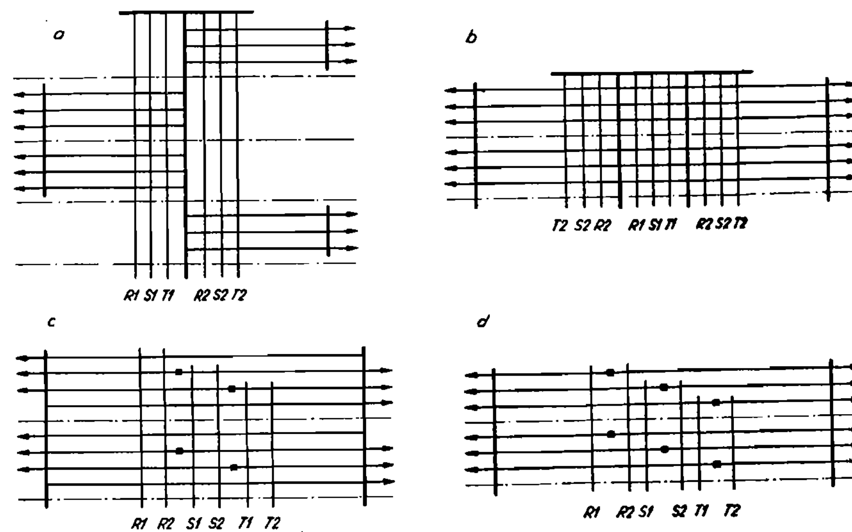
Slika 9.43. Postrojenje s miješanim fazama, nasuprotna polja bez pomaka

U težnji da se smanji površina za izgradnju rasklopnog postrojenja upotrebljavaju se rastavljači s jednim izolatorom. Pomoću takvih rastavljača moguće su u principu dvije izvedbe: sa sabirnicama smještenim na izolatoru rastavljača (sl. 9.36) i sa sabirnicama zavješenim među portalima (sl. 9.37). Prva izvedba prema dispoziciji odgovara poprečnoj, a druga uzdužnoj izvedbi. S obzirom na mogućnost izvedbe spojnog polja, U-sabirnica, pomoćnih sabirnica, za izvedbe s rastavljačima na jednom izolatoru vrijede sve napomene kao za analogna postrojenja s rastavljačima sa dva izolatora.

Na sl. 9.38. prikazano je postrojenje s dvostrukim sabirnicama i sa dvije sklopke po odvodu prema shemi sa sl. 5.11, dok je na sl. 9.39. prikazano postrojenje izvedeno prema shemi sa sl. 5.13, dakle postrojenje sa tri sklopke za dva odvoda. U postrojenju sa dvije sklopke po odvodu moguć je odlazak vodova na bilo koju stranu okomito na sabirnice, dok je u postrojenju sa tri sklopke na dva odvoda iz jednog polja moguće odvesti dva dalekovoda, svaki na svoju stranu.

Postrojenje izgrađeno prema shemi spoja u kojoj nisu predviđene sabirnice može se izvesti prema već prikazanim tipovima, koristeći pogodna rješenja. Takvo postrojenje prikazano je na sl. 9.40. (tlocrt) i 9.41. (presjeci), a izgrađeno je prema shemi spoja na sl. 5.17.

Da se smanji površina potrebna za izgradnju rasklopong postrojenja, u posljednje vrijeme izvode se postrojenja s »miješanim fazama«, u kojih se sabirnice istog sistema ne nalaze grupirane, već se međusobno grupiraju sabirnice iste faze. Na sl. 9.42. i 9.43. prikazane su dvije izvedbe postrojenja s miješanim fazama. U prvoj (sl. 9.42) su nasuprotna polja pomaknuta za razmak sabirnica, dok u drugoj (sl. 9.43) nije potreban

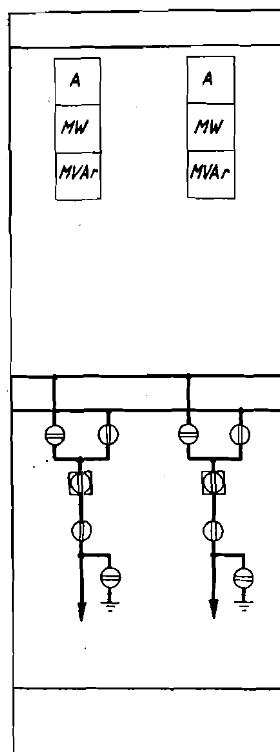


Slika 9.44. Raspored odvoda u rasklopnom postrojenju a) s dvostrukim sabirnicama, b) s U-sabirnicama, c) s miješanim fazama (sl. 9.42) i d) s miješanim fazama (sl. 9.43)

ni toliki pomak. Postrojenje s miješanim fazama može se izvesti i s rastavljačima sa jednim izolatorom, sa sabirnicama na izolatoru rastavljača. Na sl. 9.44. prikazan je — radi usporedbe — raspored odvoda za rasklopno postrojenje sa srednjim stupom i dvostrukim sabirnicama (sl. 9.24), rasklopnog postrojenja sa U-sabirnicama (sl. 9.31), te dviju izvedaba postrojenja s miješanim fazama. Prilikom usporedbi površina treba uzeti u obzir da je u postrojenju s U-sabirnicama potrebna jedna širina polja za spoj vanjskih sabirnica.

9.5. Komandne ploče

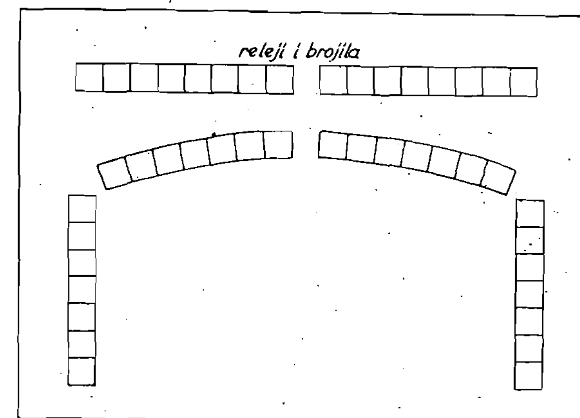
U manjim rasklopnim postrojenjima srednjeg napona, komandne ploče, na kojima su smješteni mjerni instrumenti, zaštitni releji i uređaji za upravljanje i signalizaciju, nalaze se neposredno uz ćeliju, pa ne postoji



Slika 9.45. Primjer prednje strane komandne ploče

posebna komandna prostorija. Takva prostorija, u kojoj su smještene komandne ploče, neophodna je za veća rasklopna postrojenja srednjeg napona s više sistema sabirnica, više napona i sl., te za rasklopna postrojenja na otvorenom.

Na prednju stranu komandne ploče obično se postavljaju pokazni instrumenti, uređaji za upravljanje i shema glavnih strujnih krugova (sl. 9.45). Registracioni instrumenti (ako ne služe istodobno kao pokazni), brojila, zaštitni i pomoćni releji, normalno se postavljaju na posebne ploče, koje se obično smještavaju iza komandnih (sl. 9.46), ili u posebnom nizu pored komandnih ploča. Ako je tih uređaja malo, mogu se postaviti i na stražnju stranu komandne ploče.



Slika 9.46. Primjer rasporeda komandnih ploča i ploča za releje i brojila

Manje komandne ploče (duljina do oko 8 m) povoljno je postaviti u jednoj liniji, dok se veće izvode u luku ili u izlomljenoj liniji (sl. 9.46).

LITERATURA

1. CLARK, E.: Circuit Analysis of A - C Power Systems, Wiley, New York, 1943.
2. ROEPER, R.: Kurzschluss-Ströme in Drehstromnetzen, Siemens-Schuckertwerke A.G., Erlangen, 1957.
3. DOLENC, A.: Sinhroni strojevi, skripta, Zavod za elektrostrojarstvo, Zagreb, 1962.
4. KIMBARK, E. W.: Power System Stability, Volume III, Synchronous Machines, Wiley, New York, 1956.
5. CONCORDIA, Ch.: Synchronous Machines, Wiley, New York, 1951.
6. PETROVIĆ, V. V.: Električne mašine IV, Sinhrone mašine, Zavod za izdavanje udžbenika NR Srbije, Beograd, 1961.
7. BOSANAC, T.: Reaktancije sinhronih strojeva, Informacije Rade Končar, 1954, br. 3, str. 1.
8. DESPOTOVIĆ, S.: Osnovi analize elektroenergetskih sistema, Zajednica jugoslavenske elektroprivrede, Beograd, 1962.
9. PIOTROVSKIJ, L. M.: Električeskie mašini, Gosudarstvenoe energetičeskoe izdateljstvo, Leningrad - Moskva, 1947.
10. BLANUŠA, D.: Laplaceova transformacija, skripta, Sveučilište, Zagreb, 1963.
11. DENIS-PAPIN, M. i A. KAUFMANN: Cours de calcul opérationnel, A. Michel, Paris, 1950.
12. WAGNER, C. F.: Machines Characteristics, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, Westinghouse E. C., East Pittsburg, 1950.
13. LANGSDORF, A. S.: Theory of Alternating - Current Machinery, McGraw - Hill Book Co., New York, 1955.
14. KOVÁCS, K. P. - RÁCZ I.: Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen, Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest, 1959.
15. DOLENC, A.: Transformatori, skripta, I dio, Sveučilište, Zagreb, 1961.
16. WAGNER, C. F. - R. D. EVANS: Symmetrical Components, McGraw-Hill Book Co. New York - London, 1933.
17. STEVENSON, W. D.: Elements of Power System Analysis, McGraw-Hill Book Co. New York-Toronto-London, 1955.
18. WOODRUFF, L. F., Principi prijenosa električne energije (prijevod), Školska knjiga, 1954.
19. STEFANINI, B.: Prijenos električne energije, skripta, Sveučilište, Zagreb, 1960.
20. Leitsätze für Berechnung der Kurzschlussströme, VDE 0102, Teil 1/9.62.
21. American Standard Metods for Determining the Rms Value of a Sinusoidal Current Wave and a Normal-Frequency Recovery Voltage and for Simplified Calculation of Fault Currents, American Standards Association, 1953.
22. AIEE Commitee Report, Proposed Revisions of American Standard C 37.10, AIEE Transactions 1961, Part III, str. 477.
23. GIARO, J. A.: Les courants de court - circuit dans le réseaux électriques et leurs effets nuisibles sur les câbles de puissance, Bulletin de la Societé Belge des Electriciens, 1953, str. 187.
24. Leitsätze für die Berechnung von Starkstromanlagen auf mechanische und thermische Kurzschlussfestigkeit, VDE 0103/1.61.
25. Formel- und Tabellenbuch für Starkstrom-Ingenieure, 2. izdanje, Siemens-Schuckertwerke A.G., W. Girardet, Essen, 1960.
26. KÜPFMÜLLER, K.: Einführung in die theoretische Elektrotehnik, Springer-Verlag, Berlin, 1932.

27. SCHRÖPFER, F.: Kraftwirkungen an elektrische Leitungen, Elin - Zeitschrift, 1952, str. 174.
28. BREZINŠČAK, M.: Mjere i sistemi jedinica, Tehnička knjiga, Zagreb, 1961.
29. LEHMAN, W.: Elektrodynamische Beanspruchung paralleler Leiter, ETZ - A, 1955, S. 481.
30. MASCARIN, R.: Calcul des installations de jeux de barres triphasés en vue de la résistance aux efforts électrodynamiques, Rev. gén. de l'Électricité, 1957, str. 387.
31. DUSCHEK, A.: Stromkräfte zwischen parallelen Leitern von rechteckigen Querschnitt, Archiv für Elektrotechnik, 1943, str. 293.
32. BAZJANAC, D.: Tehnička mehanika, I dio, Statika, Tehnička knjiga, Zagreb, 1959.
33. DUBBEL, H.: Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag, Berlin, 1935.
34. SIEBER, P.: Über den Einfluss von Resonanzerscheinungen auf die mechanische Kurzschlussfestigkeit von biegesteifen Stromleitern, AEG-Mitteilungen, 1959, str. 322.
35. KOCMANN, A.: Eigenschwingungen von Sammelschienen bei Berücksichtigung der Abzweigschienen, CEG-Berichte, 1956, str. 180.
36. KOCMANN, A.: Einfluss des Kröpfungswinkels der Abzweigschiene auf die Eigenfrequenz der Sammelschiene, CEG-Berichte, 1957, str. 44.
37. BALTENSPERGER, P.: Elektrodynamische Beanspruchung von parallelen Leitern, Bulletin SEV, 1944, str. 766.
38. HERGEŠIĆ, V.: Elementi strojeva, I dio (skripta), Sveučilište, Zagreb, 1961.
39. FLECK, B.: Hochspannungs- und Niederspannungs-Schaltanlagen, 3. izdanje, W. Girardet, Essen, 1955.
40. KAISER, D.: Elektrotehnički priručnik, 2. izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1958.
41. PEHANI, E.: Iz teorije o osiguračima, Elektrotehnički Vjesnik, 1958, str. 84.
42. BITTER, H. - HEINZE, W.: Die Kurzschlussbegrenzung der Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherung, Siemens-Zeitschrift, 1952, str. 372.
43. CANTARELLA, G.: L'interruzione di corrente alternata mediante fusibili — L'energia transformata nell'arco, L'elettrotecnica, 1960, str. 262.
44. MAUDUIT, A.: Installations électriques à haute et basse tension, 2. izdanje, Dunod, Paris, 1950.
45. BITTER, H.: Einfluss der Bemessung der Steuerstromdrähte auf die Grösse der Löscharbeit bei HH - Sicherungen, Siemens-Zeitschrift, 1958, str. 30.
46. MEIER, F.: Einfluss von Schaltmoment und Phasenverschiebung auf die Beanspruchung von Sicherungen bei Kurzschlussabschaltungen, Bull. SEV, 1955, str. 101.
47. BITTER, H.: Zur Frage der Lichtbogenarbeit in Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen, ETZ-B, 1960, str. 608.
48. BAUER, R.: Die Messwandler, Springer - Verlag, Berlin - Göttingen - Heidelberg, 1953.
49. NEUGEBAUER, H.: Selektivschutz, 2. izdanje, Springer - Verlag, Berlin - Göttingen - Heidelberg, 1958.
50. BEGO, V.: Električna mjerenja (laboratorijske vježbe) I dio, Zagreb, 1962; II dio, Zagreb, 1964 (skripta).
51. ŠIRIĆ, S.: Mjerni transformatori, Referat 3.5, Zbornik predavanja sa seminara »Elektroindustrijska problematika velikih elektrana«, Zavod za elektrostrojarstvo Elektrotehničkog fakulteta, Zagreb, 1957.
52. KAHNT, H.: Kapazitive Spannungswandler, ETZ - B, 1959, str. 476.
53. STRIEGEL, W.: Kapazitive Spannungswandler, Elektrizitätswirtschaft, 1959, str. 803.
54. ZAHORKA, R.: Betriebsverhalten kapazitiver Spannungswandler, ETZ - A, 1960, str. 381.
55. KALTOFEN, A.: Die kapazitiven Spannungswandler der AEG, AEG-Mittellungen, 1956, str. 197.
56. SCHULZE, H.: Technik der Wechselstrom-Hochspannungsschalter, VEB Verlag Technik, Berlin, 1961.
57. MANZINGER, H.: Über die Lastabschaltung mit Trennschaltern, ÖZE, 1950, str. 118. (Ref. ETZ-A, 1951, str. 88).
58. MANZINGER, H.: Die Vermeidung von Betriebsstörungen an Hochspannungs-Trennschaltern in Innenraum-Schaltanlagen, EuM., 1953, str. 274 i 296.

59. BABIKOV, M. A.: Wichtige Bauteile elektrischer Apparate, Band I: Theoretische Einführung, VEB Verlag Technik, Berlin, 1954.
60. HOCHRAINER, A.: Das Schalten grosser Ströme, AEG-Mitteilungen, 1957, str. 213.
61. MAYR, O.: Beiträge zur Theorie des statischen und dynamischen Lichtbogens, Arhiv für Elektrotechnik, 1943, str. 588.
62. MAYR, O.: Über die Theorie des Lichtbogens und seine Löschung, ETZ 1943, str. 645.
63. TER HORST, Th. - RUTGERS, G. A. W.: La physique des arcs électriques dans dans les disjoncteurs pneumatiques, Bull. Montefiore, 1957, str. 201 (Ref. ETZ-A 1958, str. 510).
64. BALTENSPERGER, R.: Statistische Untersuchungen über Eigenfrequenzverhältnisse in möglichst vielen Netzen, Bull. SEV, 1955, str. 505.
65. JOHANSEN, O.: Handbok for Berakning av dem transients atervandande spaningen, Svenska Elverksförmingen, Stockholm, 1952.
66. SCHNESSL, F.: Die Kurzschlussvorgänge, VEB Verlag Technik, Berlin, 1959.
67. KURTH, F.: Méthode pour la mésure directe du taux de la tension de rétablissement dans les réseaux sans interruption de service, CIGRE 1950, ref. 136.
68. FORMARIER, P.: Méthode experimentale nouvelle de détermination de la tension de rétablissement, CIGRE 1950, ref. 117.
69. LABORDE, M. E., BARON Y. C., FALLOU M., MASCARIN M., POUARD M.: Contribution experimentale du Centre de Recherches de Fontenay à l'étude de certains phénomènes d'interruption, CIGRE 1954, ref. 149.
70. HOCHRAINER, A.: Der Netzanalysator, ein Gerät zur Nachbildung von Schaltvorgängen im Modell; Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen, Tech. Bericht 176 od 25. 11. 1955; 2. Teilber., str. 76.
71. KRIECHBAUM, K.: Über die Messung der Einschwingspannung im Netzanalysator, ETZ - A, 1959, str. 193.
72. POUARD, M.: Nouvelles notions sur les vitesses de rétablissement de la tension aux bornes de disjonteurs à haute tension, Bull. SFE, 1958, str. 748.
73. MEYER, H.: Die grundlegenden Probleme der Hochspannungsschalter, BBC - Nachr., 1951, str. 68.
74. DOLENC, A.: Transformatori, svezak II, Sveučilište, Zagreb, 1962.
75. BÖDEFELD, Th. - SEQUENZ, H.: Elektrische Maschinen, 6. izdanje, Springer-Verlag, Wien, 1962.
76. ALEKSENKO, G. V. - AŠRJATOV, A. K. - FRID, E. S.: Ispitivanija visokovoltnih i mošćnih transformatorov i avtotransformatorov, I dio, Gosenergoizdat, Moskva, 1962.
77. PADJEN, L.: Sadašnje stanje tehnike visokonaponskih kabela i mogućnosti izbora za potrebe naših mreža, Jug. nac. komitet CIGRE, VI stručno savjetovanje, Budva, 1962.
78. KAISER, D.: Elektrotehnički priručnik, 3. izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1964.
79. TELLIER, M. R.: Quelques résultats d'essais directs sur le réseau, Bull. SFE, 1960, str. 511.
80. HELD, Ch.: Kabel für höchste Übertragungsspannungen, Siemens - Z., 1961, str. 129.
81. HILGENDORF, H. J. - SEIFFE, F.: Höchstspannungskabel für Energieübertragung, Bull. SEV, 1962, str. 197.
82. Odvodnici prenapona s nelinearnim otporima, Prijedlog jugoslavenskog standarda, JUS N. B2.050/1958.
83. IEC, Technical Commitee Nr. 37: Lightning Arresters - Experts Committee, 37 Experts (Secretariat) 15. mart 1961.
84. GRUDINSKIJ, P. G.: Shemi komutacii električeskih stancii i podstancii, Gosenergoizdat, Moskva, 1958.
85. Tehnički propisi za pogon, održavanje i reviziju elektroenergetskih postrojenja, Sl. list FNRJ, br. 6, 1957.
86. ILICETO, F.: Sugli schemi di principio e di disposizione degli equipaggiamenti, per stazioni elettriche ad alta tensione, L'elettrotecnica, 1964, str. 262.
87. Central Electricity Autority, Standardisation of 132 kV Switching Stations, Transmission Design Circular No. 80.
88. FRANK, S.: Drehstrom - Arbeitszählung in Hochspannungs-Anlagen, ETZ - A, 1954, str. 551.

89. BEETZ, W.: Elektrizitätszähler, Vieweg u. Sohn, Braunschweig, 1958.
90. MACHÁČEK, C.: Elektroměry - technika a praxe, Elektrotechnicky svaz československý, Praha, 1946.
91. SCHMIEDEL, K.: Prüfung der Elektrizitätszähler, 4. izdanje, Springer - Verlag, Berlin - Göttingen - Heidelberg, 1954.
92. LONČAR, J.: Električka mjerenja, 3. izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1960.
93. ANGERSBACH, F.: Zeigerfrequenzmesser mit einem Reiheresonanzkreis und einer Drossel, Archiv für Technisches Messen, V 3612-4.
94. GAYGER, W.: Zeiger - Frequenzmesser, Archiv für Technisches Messen, V 3612-3.
95. WALTER, M.: Relejna zaštita, Elektra, Zagreb, 1954.
96. FEDOSSEJEV, A. M.: Relaisschutz von elektrischen Netzen und Anlagen, I. Band, VEB Verlag Technik, Berlin, 1955; II. Band, VEB Verlag Technik, Berlin, 1957.
97. NEUGEBAUER , H.: Messtechnische Grundlage der Wiederstandmessung beim neuen Siemens-Leitungsschutz, Siemens-Z., 1951, str. 244.
98. Distanzschutz R1Z25a, Technische Angaben, Siemens-Schukertwerke A. G.
99. NEUGEBAUER, H.: Gleichstrom - Drehspulrelais mit Gleichrichter für die Selektivschutztechnik, ETZ, 1950, str. 389.
100. PHAFF, C. J. R. - K. von BUZAY: Kreisdiagramme richtungsabhängiger Impedanz-Drehfeldrelais, Brown - Boveri Mitteillungen, 1962, str. 173.
101. LUNZE, K.: Berechnung elektrischer Stromkreise, VEB Verlag Technik, Berlin, 1959.
102. FERSCHEL, L.: Der Vergleichsschutz in Hochspannungsnetzen und Anlagen, EuM., 1964, str. 557.
103. PIANTA, L.: Metodi e schemi per le protezioni di sbarra, L'energia electrica, 1964, str. 583.
104. RÜDENBERG, R.: Transient Performance of Electric Power Systems, McGraw-Hill Book Co. New York, 1950.
105. KOCH, W.: Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1961.
106. PETROCOCINO, M. D.: De la prise de terre localisée au réseaux entendu, Révue génerale de l'Électricité, 1950, str. 53. i 117.
107. HENNEY, K. A.: Der Ausbreitungswiderstand von Starkstromerdern in Abhängigkeit von Bodenbeschaffenheit und Witterung, ETZ, 1938, str. 45.
108. FALETTI, N., C. ROSSIGNANI, G. MALAMAN: Alcuni risultati di ricerche su modelli di impianti di terra per stazioni ad alta tensione, L'energia elettrica, 1955, str.
109. GROSS, E. T. B., B. V. CHITNIS, L. J. STRATTON: Grounding Grids for Highvoltage Stations, AIEE Trans., 1953, dio III, str. 799.
110. GROSS, E. T. B., R. B. WISE: Grounding Grids for Highvoltage Stations, AIEE Trans., 1955, dio III, str. 801.
111. GROSS, E. T. B., R. B. HOLLITCH: Grounding Grids for Highvoltage Stations, AIEE Trans., 1956, dio III, str. 926.
112. Technický průvodce, Elektrotechnika, část I, Česká Matice Technickà, Praha, 1946.
113. MARKOVIĆ, R. N.: Poznavanje elektrotehničkog materijala, Naučna knjiga, Beograd, 1959.
114. HOPPNER, A.: Handbuch für Planung, Konstruktion und Montage von Schaltanlagen, BBC A.G., Baden, 1964.
115. SOMMERLATTE, F.: Konstruktion von Schaltanlagen, VEB Verlag Technik, Berlin, 1956.
116. BRAMBILLA, A.: Sulle distanze nette in aria tra conduttori e massa e tra conduttori. L'electtrotecnica 1962, str. 13.
117. HOCHRAINER, A.: Kurzschlusslichtbögen in Hochspannungsschaltanlagen, ETZ - A 1962, str. 202.
118. PARSCHALK, F.: Hochspannungsschaltanlagen bis 30 kV der offenen Zellenbauweise, ETZ - A 1962, str. 207.
119. HENNECKE, G. - W. HORN: Über Druckentwicklung und Strahlung bei Lichtbogenkurzschlüssen in Schaltanlagen, Conti-Elektro - Ber. 1960, str. 119.
120. WEGESIN, H. - W. LEONHARDT: Untersuchungen über die Auswirkungen von Kurzschlusslichtbogen in offenen und gekapselten Schaltanlagen, ETZ - A 1957, str. 305 i 911.

121. HOCHRAINER, A.: Die Bewegung des Kurzschlusslichtbogens in offenen und gekapselten Mittelspannungs-Schaltanlagen, ETZ - A 1956, str. 302.
122. MANZIGER, H.: Über Schaltanlagenbauformen für Mittelspannungs-Freileitungsnetze, EuM., 1950, str. 268.
123. MEINERS, G.: Zur Technik der Hochspannungs-Schaltanlagen in Schrankform für Freiluftaufstellung, AEG-Mitt. 1959, str. 257.
124. BRÜCKNER, P.: Stahlblechgekapselte Schaltanlagen — Erhöhung der Sicherheit durch Anwendung von Giessharzisolation und trennerlose Bauweise, ETZ - A 1962, str. 216.
125. SCHRANK, E.: Neue Bauweise für Mittelspannungs-Schaltanlagen, Elektrizitätswirtschaft 1958, str. 209.
126. HEILMANN, W.: Trennerlose Hochspannungs-Schaltfelder mit Phasentrennung, Elektrizitätswirtschaft 1960, str. 219.
127. KLEMM, W.: Neuzeitliche Schaltanlagen für Mittelspannung, ihre Entwicklung und Anwendung, Conti-Elektro-Berichte 1960, str. 128.
128. KLEMM, W.: Standard-Schaltwageneinheiten bis 30 kV mit Druckausgleichschaltern LF 12 i LS 14, Conti-Elektro-Berichte 1962, str. 11.
129. HEEGER, W.: Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Schaltwagen-Anlagen, Elektrizitätswirtschaft, 1963, str. 250.
130. TERHORST, A. - K. H. WIESENEWSKY: Untersuchung des Geländebedarfs und des Kostenaufwands für verschiedene Bauformen von 220 kV - Freiluft-Schaltanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Bauformen mit gemischten Phasen, AEG-Mitt. 1961, str. 324.
131. SALLARD, J.: Réduction des dépenses de premier établissement des postes du réseau de transport d'énergie d'Electricité de France, Rev. gén. de l'électricité 1955, str. 525.
132. GAULET, G. - J. SALLARD: Exposé de quelques tendences actuelles dans l'équipement des postes du réseau de transport d'énergie français, CIGRE 1954, ref. 143.
133. PARIZY, J - CAZALET, P.: Architectural and Constructional Problems in Substations. New Trends in Measurement and Recording Gear, CIGRE, 1962, ref. 156.
134. SALLARD, J. - M. REY - P. MOULIN: Application de la disposition à phases mixtes aux postes du réseau de transport d'Electricité de France. Le poste de Mions premier ouvrage da se type. Rev. gén. de l'Électricité, 1956, str. 431.
135. SCHMITT, J.: Freiluft - Schaltanlagen für Höchstspannungen vom Standpunkt des Raumbedarfs, BBC-Nachr. 1959, str. 337.
136. BABORSKY, A.: Rasklopna postrojenja 110 kV na skučenom prostoru, Tehnika .1957, str. 1349.
137. BEGOVIĆ, K.: Neka rješenja rasklopnih postrojenja 220 kV u posebnim uslovima, Tehnika, 1957, str. 1855.
138. DVOSKIN, L. I.: Novie komponovki otkritih raspredelitelnih ustroistv 110—220 kV, Električeskie stancii 1957, br. 4, str. 44.

KAZALO

Znak: 7806 Sv

Izdanje:
Prof. dr ing. HRVOJE POŽAR
VISOKONAPONSKA RASKLOPNA POSTROJENJA

Izdavač:
TEHNIČKA KNJIGA, izdavačko poduzeće
OOUR IZDAVAČKA DJELATNOST
ZAGREB, Jurišićeva 10

Za izdavača odgovara
glavni urednik:
Ing. ZVONIMIR VISTRIČKA

Stručna recenzija:
Prof. ing. ANTON DOLENC

Urednik edicije:
Ing. IVAN UREMOVIĆ

Lektorirao:
ZVONIMIR VELJAČIĆ

Ofsetni tisak:
ŠTAMPARIJA »OBOD« — CETINJE

Tisak dovršen:
TRAVNJA 1978.